

扬子陆块西缘古元古代基性侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义

王冬兵, 尹福光, 孙志明, 王立全, 王保弟, 廖世勇, 唐 渊, 任光明

WANG Dong-bing, YIN Fu-guang, SUN Zhi-ming, WANG Li-quan, WANG Bao-di,
LIAO Shi-yong, TANG Yuan, REN Guang-ming

成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081

Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China

摘要: 扬子陆块西缘康滇南北向构造带内发育大量古元古代基性岩脉(墙), 它们对于认识扬子陆块早期的构造演化具有重要意义。对四川会理地区侵入到元古界通安组内的辉长岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素测定, 获得的 $^{207}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $1694\text{Ma} \pm 16\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.9$), 代表了该辉长岩的形成和侵位时代, 这一结果指示会理地区通安组应为古元古代地层。辉长岩全岩地球化学具有类似于 N-MORB 的特征。辉长岩锆石初始 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 值为 $0.281881 \sim 0.281982$, 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $6.2 \sim 9.8$, 单阶段亏损地幔 Hf 模式年龄 t_{DM1} 为 $1738 \sim 1883\text{Ma}$, 平均值为 1803Ma 。这些数据表明古元古代辉长岩来源于亏损地幔, 指示古元古代晚期扬子西缘之下存在亏损地幔。结合扬子西缘大量古老的碎屑锆石, 推测扬子陆块西缘存在太古宙—古元古代的结晶基底。与扬子陆块西缘古元古代晚期基性侵入岩形成有关的幔源岩浆事件明显晚于扬子陆块古元古代碰撞造山及造山后的伸展作用, 记录了扬子陆块古元古代晚期一次伸展过程, 可能是 Columbia 超大陆裂解作用在扬子陆块的响应。

关键词: 扬子陆块西缘; 古元古代; 基性侵入岩; U-Pb 定年; 锆石 Hf 同位素; 结晶基底; 超大陆裂解

中图分类号: P534.3; P597⁺.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2013)04-0617-14

Wang D B, Yin F G, Sun Z M, Wang L Q, Wang B D, Liao S Y, Tang Y, Ren G M. Zircon U-Pb age and Hf isotope of Paleoproterozoic mafic intrusion on the western margin of the Yangtze Block and their implications. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(4):617-630

Abstract: A large number of mafic dykes occur in the Kang-Dian Axis of the western Yangtze Block, which had a great bearing on the early evolution of the Yangtze Block. In this paper, zircon U-Pb age, Hf isotope, and whole-rock geochemistry were studied for gabbros collected from Jiaopingdu area, which intruded into the Tongan Formation, with the purpose of constraining the age of the crystallization basement and the early evolution of the Yangtze Block. The zircons yielded a weighted mean $^{207}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ age of $1694\text{Ma} \pm 16\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.9$), which is interpreted as the intrusion age. The results constrain the depositional age of the Tongan Formation to 1694Ma , implying that the Tongan Formation is of Paleoproterozoic. Geochemical data show that these gabbros have N-MORB affinity. Initial Hf isotope ratios ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i of the zircons range from 0.281881 to 0.281982 , with corresponding $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of $6.2 \sim 9.8$. These zircons give the depleted mantle model ages (t_{DM1}) of $1738 \sim 1883\text{Ma}$ (1803Ma on average), slightly older than the time of the zircon growth. All these data suggest that the Paleoproterozoic gabbro was derived from a depleted mantle. In combination with the presence of abundant Archean to Paleoproterozoic detrital zircons in the Mesoproterozoic strata, the newly identified 1694Ma mafic intrusion in the western Yangtze block supports the existence of an Archean-Paleoproterozoic crystalline basement beneath the

收稿日期: 2012-04-25; 修订日期: 2012-08-20

资助项目: 国家重点研究发展计划项目《特提斯演化过程中的 VMS 型 Cu-Pb-Zn 成矿作用》(编号: 2009CB421003) 和中国地质调查局项目《西南三江成矿带地质矿产调查评价成果集成》(编号: 12120113049100)、《川滇黔地区基础地质调查成果集成》(编号: 12120113050300)、《扬子地块西缘格伦维尔造山过程、南华裂谷作用研究及其成矿效应综合研究》(编号: 1212011220901)

作者简介: 王冬兵(1981-), 男, 工程师, 从事西南地区基础地质调查研究工作。E-mail: wangdb06@163.com

western Yangtze block. The results obtained by the authors also show that the tectonic event, which resulted in the intrusion of large quantities of late Paleoproterozoic mafic dykes in the western Yangtze block, was obviously younger than the continental collision and post-orogenic extension of Columbia supercontinent recorded in Yangtze block, and thus most probably linked to the breakup of Columbia supercontinent.

Key words: western margin of the Yangtze Block; Paleoproterozoic, mafic intrusion; zircon U-Pb age; zircon Hf isotope; crystallization basement; breakup of the Columbia supercontinent

扬子和华北大块是中国东部最大的 2 个前寒武纪块体,两者于三叠纪沿秦岭-大别造山带最终碰撞在一起^[1-3],构成了现今中国东部大陆的主体。在华北陆块,太古宙的岩石在河北曹庄^[4]、辽宁鞍山^[4-5]、河南信阳^[6]等地较大范围出露,同时有大量与 Columbia 超大陆聚合和裂解有关的古元古代构造热事件的记录^[7-12]。与华北陆块不同,扬子陆块上太古宙岩石仅在宜昌崆岭个别地区出露^[13-15],大量出露的是元古宙岩石及地层^[16];与古元古代超大陆聚合和裂解相关的地质记录在扬子陆块上仅有少量报道,并且集中在扬子陆块北部崆岭地区^[17-20]。由于太古宙-古元古代露头较少,严重制约了对扬子陆块早期演化历史的认识。

扬子陆块西缘康滇南北向构造带,即习惯上所称的康滇地轴,广泛出露变质程度不同、时代相异的变质岩系,构成了扬子陆块西缘前南华纪基底^[21]。扬子陆块西缘会理-东川等地分布着大量元古宙浅变质岩系,这些基底岩系内发育不同规模的基性岩脉、岩墙等^①。前人根据野外侵入关系认为,扬子陆块西缘会理-东川等地区基性岩墙(脉)主要有古元古代(本文采用国际地质年代表以 1600Ma 作为古元古代与中元古代的分界,下文同)和二叠纪 2 期侵入^①,但无精确的同位素年龄数据约束。基性岩墙(脉)主要由幔源玄武质岩浆沿张性裂隙贯入而形成^[22],通常被作为区域伸展作用的标志^[23],它们既能为上地幔的物质组成提供制约,又蕴含着有关古大陆聚合和分离时代、过程的重要信息,因而具有重要的构造及地球动力学意义^[24-26]。

准确测定扬子西缘古元古代基性侵入岩的形成时代,研究其地球化学性质,对于认识扬子陆块早期构造演化历史具有重要的意义。本文对扬子陆块西缘会理地区侵入到元古宇通安组内的辉长岩中的锆石进行 LA-ICP-MS 原位微区 U-Th-Pb 同位素测定、Hf 同位素和全岩地球化学分析,为限定地层时代、探讨结晶基底和地幔性质,以及认识扬子板块古元古代构造演化历史提供重要的制约。

1 研究区地质概况与样品分析

扬子陆块西缘康滇南北向构造带纵贯川、滇 2 省,南北长逾 800km,东西宽 100~200km,面积约 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中前南华系出露面积超过 $310 \times 10^4 \text{ km}^2$,是中国南方前南华纪地层出露最为广泛的地区之一^[21](图 1-a)。四川会理-云南东川地区的元古宇出露较好,发育相对比较完整。云南东川地区前南华纪地层主要为东川群及其下伏汤丹群,二者均为浅变质沉积岩系。东川群自下而上分为因民组、落雪组、黑山组、青龙山组^[27],因民组砂岩中碎屑锆石年龄最年轻的一组约为 1780Ma,侵入其中的基性岩脉锆石的上交点年龄为 $1692 \text{ Ma} \pm 32 \text{ Ma}$ ^[28],黑山组凝灰岩的锆石年龄为 1503 Ma ^[29],限定东川群为古元古代晚期-中元古代早期地层;汤丹群自下而上包括洒海沟组、望厂组、菜园湾组、平顶山组,朱华平等^[30]报道了撒海沟组熔结凝灰岩中锆石和平顶山组沉积砾岩中碎屑锆石的年龄,尽管年龄结果非常复杂且对结果的解释有待进一步检验,但大量的古老锆石表明汤丹群为古元古代的沉积地层。四川会理、会东地区前南华纪地层主要为会理群及其下伏的河口群,前者主要是由板岩、千枚岩、薄板状灰岩、英安岩和英安质凝灰岩等组成的一套浅变质火山-沉积岩系,后者主要是由片岩、大理岩和由碧碧角斑岩系等组成的一套浅变质岩系^[27]。会理群自下而上分为力马河组、凤山营组、天宝山组,天宝山组英安斑岩的年龄为 1029 Ma ^[31],限定会理群为中元古代晚期地层;河口群自下而上分为大营山组、落函组、长冲组,大量同位素年龄表明其为古元古代地层(据参考文献[32]及其内参考文献)。四川会理通安地区的元古宇被单独命名为通安组,细分为 5 段,各段之间多以断层接触。通安组一段主要为板岩、片岩夹变质砂岩,二段为白云岩,三段为板岩、千枚岩夹结晶灰岩,四段为白云岩夹板岩,五段主要为炭硅质板岩和千枚岩^①。会理通安地区通安组的时代无有效的同位素年代学数据约束,根据岩性其一至四段可与东川地区的东川群相对比。

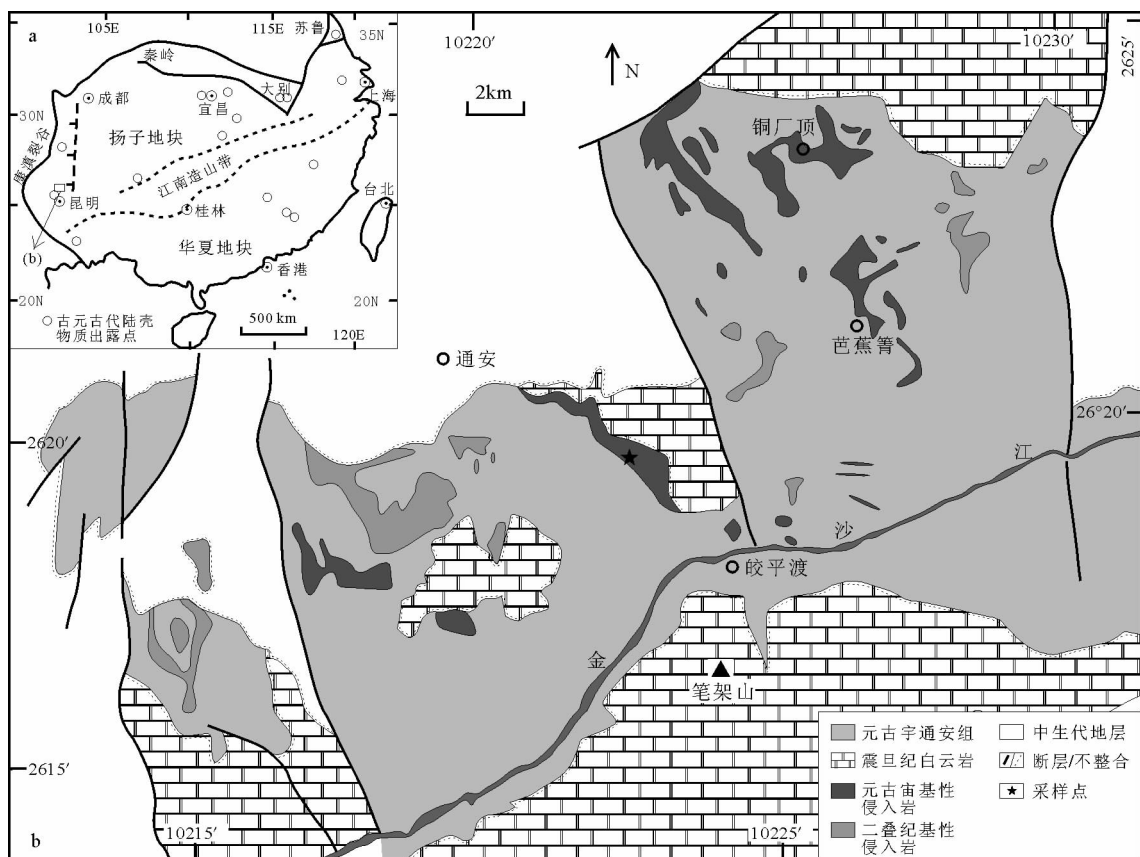


图 1 古元古代陆壳物质在华南分布示意图(a)(据参考文献[16]修改)

和研究区地质简图及采样点(b)(据参考文献①修改)

Fig. 1 Sketch map showing distribution of Paleoproterozoic crustal materials in South China (a) and simplified geological map of the study area on the western margin of Yangtze Block, South China (b)

会理—东川地区的元古宙基底岩系内发育大量不同规模的基性岩脉、岩墙等,如会理通安皎平渡、芭蕉箐等地区,东川拖布卡、三风口、因民等地区。前人根据野外侵入和接触关系认为这些基性岩脉、岩墙等主要为古元古代和二叠纪。野外可见大量不同规模的基性岩脉、岩墙。由于 2 期侵入岩侵入的地层相似,本研究为避免将二叠纪基性侵入岩误认为是古元古代岩石,在野外地质考察中仅考察和采集“侵入到中元古代地层且两者一起被震旦纪白云岩不整合覆盖”的露头点。在确定侵入岩年龄后,再进行地球化学研究。

本研究中的古元古代基性侵入岩(辉长岩)来自会理通安至皎平渡公路剖面,地理坐标为北纬 $26^{\circ}19'44''$ 、东经 $102^{\circ}22'49.6''$ (图 1-b)。研究区的辉长岩体沿公路及陡崖出露很好(图版 I-a),并侵入到通安组内(图版 I-b),被震旦纪白云岩不整合覆

盖(图版 I-c),岩体规模相对较大,未经历变质、变形作用,外观整体较新鲜(图版 I-e)。显微镜下可见主要矿物为蚀变斜长石(约 50%)、单斜辉石(35%~40%)、绿帘石—绿泥石(5%~10%)、磁铁矿(2%~3%),具粗中粒辉长结构、辉长—辉绿结构。从辉长岩样品(10JPD03-1)中分选出锆石颗粒,用于原位微区 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析和 Hf 同位素分析。在金沙江河谷皎平渡往通安方向的“之”字形公路上,多处可见宽度为 1~3m 的辉绿岩脉,它们侵入到通安组且被震旦纪白云岩不整合覆盖(图版 I-d),但由于规模较小、粒度较细,未挑选出锆石。

2 分析方法

用于全岩主量元素和微量元素分析的样品,无污染粉碎至 200 目以下。主量元素分析在西北大学

图版 I Plate I



a.研究区野外宏观照片;b.①号点处辉长岩侵入到通安组;c.②号点处侵入到通安组内的辉长岩被震旦纪白云岩不整合覆盖;d.③号点处辉绿岩脉侵入到通安组三段;e.②号点处辉长岩露头

大陆动力学国家重点实验室采用 XRF(Rigaku RIX 2100 型)玻璃熔饼法完成。对美国地质调查局(USGS)标准参考物质 BCR-2 和中国标准参考物质 GSR-3 的分析结果表明,主量元素分析精度和准确度均优于 4%。微量元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 Agilent 7500a 型 ICP-MS 完成。样品溶解采用 1.5mL HNO_3 +1.5mL HF 混合酸在 Teflon 高压密闭容样弹中进行,以确保所有难容矿物均被溶解。实验过程中,对美国地质调查局(USGS)标准参考物质 BCR-2、BHVO-2 和 AGV-1 的分析结果表明,微量元素分析精度和准确度一般优于 5%。

锆石分选在河北区域地质矿产调查研究所实验室完成,原岩样品经手工和人工粉碎,经人工淘洗后去除轻矿物,将得到的重砂经电磁选得到含有少量杂质的锆石样品,最后在双目镜下挑选出锆石晶体。选择晶形较好、无裂隙、无包裹体的锆石颗粒粘贴在环氧树脂表面制成锆石样品靶,打磨样品靶,使锆石的中心部位暴露出来,然后进行抛光。对锆石进行反射光、透射光显微照相和阴极发光(CL)图像分析,最后根据反射光、透射光及锆石 CL 图像特征选择代表性的锆石颗粒和区域进行 U-Pb 测年和 Hf 同位素分析。CL 照相在西北大学大陆动力学国家重点实验室采用美国 Gatan 公司生产的阴极荧光谱仪(型号 Mono CL3⁺)完成。

锆石原位微区 U-Th-Pb 测年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)完成。激光剥蚀系统为配备有 193nm ArF 准分子激光器的 GeoLas 2005,ICP-MS 为 Agilent 7500a。激光剥蚀孔径为 32 μm ,采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度。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^[33]完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同参考文献[34]。

锆石微量元素含量利用 USGS 参考玻璃 Nist610 作为外标、Si 作内标的方法进行定量计算。U-Th-Pb 同位素测定中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移,利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行校正^[35]。锆石 U-Pb 谐和图

绘制和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄加权平均值计算采用 Isoplot/Ex_ver3^[36]完成。

锆石原位 Lu-Hf 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室利用 Nu Plasma 型 MC-ICP-MS 完成,激光剥蚀系统为配备有 193nm ArF 准分子激光器的 GeoLas 2005。在已测定过年龄的锆石颗粒上选择相同(似)区域进行 Hf 同位素测试,激光束斑直径为 44 μm ,剥蚀频率为 10Hz,具体分析及仪器参数详见 Yuan 等^[37]。用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.02669$ ^[38]和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}=0.5886$ ^[39]进行同质异位干扰校正计算测定样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值。样品测定过程中以标准锆石 91500 作为标样,并同时测定标准锆石 GJ-1 和 MON-1。实验中 91500 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 $0.282316\pm 26(2\sigma, n=28)$,与推荐值 0.282307 ± 31 在误差范围内一致^[40]。 ϵ_{Hf} 计算采用 ^{176}Lu ,衰变常数为 $1.865\times 10^{-11}\text{a}^{-1}$ ^[41],球粒陨石现今值 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282772$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0332$ ^[42];单阶段亏损地幔 Hf 模式年龄(t_{DM1})计算采用现今亏损地幔值 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28325$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0384$ ^[43]。

3 分析结果

3.1 主量元素和微量元素

辉长岩样品的主量、微量元素分析数据见表 1。它们的主量元素组成较为一致,具有较低的 SiO_2 (45.91%~46.77%)、 K_2O (0.74%~0.83%) 和 TiO_2 (0.64%~0.70%),中等的 Al_2O_3 (13.18%~13.44%),中等—高的 MgO (8.47%~9.16%)、 CaO (9.48%~10.93%)、 Na_2O (2.76%~3.10%)、 $\text{Mg}^\#$ (59.1~60.5) 和烧失量 (2.60%~3.01%)。在不活动元素岩石分类图解 Nb/Y-Zr/TiO₂ (图 2-a) 中,样品落在亚碱性玄武岩区域,在 SiO_2 -TFeO/MgO 图解中落入拉斑玄武岩系列区域(图 2-b)。这些辉长岩具有较低的稀土元素含量和总稀土元素($\sum \text{REE}=20\times 10^{-6}\sim 21.5\times 10^{-6}$),在球粒陨石标准化图解上显示出无轻、重稀土元素分馏,无 Eu 异常,为一条低的、近似平直的直线(图 3-a)。在原始地幔标准化图解上,高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti 无异常,除活动元素 Rb、Ba 和 Sr 为富集外,其余元素总体显示为一条类似于 N-MORB 的曲线,明显不同于 E-MORB 和 OIB(图 3-b)。

3.2 锆石 U-Pb 年龄

辉长岩样品 10JPD03-1 中的锆石较少,多为浅黄色,晶体颗粒不完整,无磨圆。锆石阴极发光图像

(CL)显示锆石主要为板状无分带结构,少量锆石具有较宽的弱振荡环带,无继承性核、无变质增生边,属岩浆结晶的产物,并且与高温基性岩石锆石特征类似^[46](图 4)。

对样品中的 22 颗锆石进行了 22 个点的 U-Th-Pb 同位素测定,获得的同位素比值及年龄结果见表 2 和图 5。22 个锆石分析点的 Th/U 比值为 0.2~2.9(表 2),且绝大多数大于 0.4,符合岩浆型锆石的特征^[46]。所有数据投影点均分布在 U-Pb 谐和图中的谐和线上,22 个分析点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄加权平均值为 $1694\text{Ma}\pm 16\text{Ma}$ (MSWD=0.9, $n=22$)(图 5)。

3.3 锆石 Hf 同位素

在 U-Th-Pb 同位素分析的基础上,利用 LA-MC-ICP-MS 对其中 10 颗锆石进行了 10 个点的 Lu-Hf 同位素分析,结果列于表 3 和图 6。10 个分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.281925~0.282045,以各单颗粒锆石结晶年龄计算出锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始值为 0.281881~0.281982,对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)=6.2\sim 9.8$,平均值为 8.3;计算得到锆石单阶段亏损地幔 Hf 模式年龄 t_{DM1} 为 1738~1883Ma,平均值为 1803Ma。

4 讨论

4.1 成岩时代及地层学意义

基性侵入岩中的锆石既可能是从围岩中捕获而来的,也可以是从基性岩浆中结晶的,只有从基性岩浆中结晶的锆石年龄最接近于基性侵入岩的年龄,可以代表基性岩侵位年龄^[47]。本研究中的锆石外形上无磨圆,内部结构具有板状无分带特征,少量锆石具有较宽的弱振荡环带,无继承核、无变质边,应为高温基性岩浆中结晶的锆石^[46]。所有锆石均具有较低的 Th、U 含量和高的 Th/U 比值,这些特征与基性岩浆中结晶的锆石特征一致。此外,基性岩捕获围岩锆石的年龄通常呈串状分布在谐和图上,与之不同,本文所有分析锆石具有一致的年龄值。综上所述,锆石外部形态和内部结构、微量元素特征及年龄分布特征表明,本次研究的锆石为基性岩浆结晶锆石。这些岩浆锆石给出的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄加权平均值为 $1694\text{Ma}\pm 16\text{Ma}$ (MSWD=0.9, $n=22$),该年龄应该代表了辉长岩的结晶时代。

本研究中辉长岩侵入到通安组内,并且与通安组一起被震旦纪白云岩不整合覆盖,故通安组的沉积时代应早于辉长岩的侵入时代 $1694\text{Ma}\pm 16\text{Ma}$,应

属于古元古代或更老的地层。四川会理地区河口群根据群内石英砂岩锆石最年轻的年龄 1817Ma ^[48]和石英角斑岩的锆石年龄 1722Ma ^[32]限定其为古元古代晚期的火山-沉积地层。Zhao 等^[28]对云南东川群因民组砂岩中的碎屑锆石进行测年获得最年轻的一组年龄约为 1780Ma ;此外,虽然所有单颗粒锆石均为不谐和年龄,但获得侵入因民组内基性岩脉锆石的上交点年龄为 $1692\text{Ma}\pm 32\text{Ma}$ 。Zhao 等^[28]观察发现透射光下锆石有黑色的断裂纹,根据锆石具高 Th 和 U 含量,认为可能是由于锆石自身放射性损伤造成的,并将上交点年龄解释为基性岩脉形成的时代。尽管这种解释存在一定的不确定性,但其与因民组碎屑锆石年龄一起提供了有意义的信息。朱华平等^[30]获得东川地区侵入到因民组内的辉绿岩锆石年龄为 $1667\text{Ma}\pm 13\text{Ma}$ 。东川群碎屑锆石及侵入其内的辉绿岩年龄限定东川群应为古元古代晚期地层。因而,从同位素年代学方面看,在建立区域地层柱时应将会理地区的通安组与河口群一起置于会理群之下,并可与东川地区的东川群进行对比。

4.2 源区性质

研究的辉长岩在显微镜下可见含量约占 50%的斜长石均为蚀变斜长石,全岩主量元素烧失量为 2.60%~3.01%,表明岩石受到了蚀变影响。因而,在后文中主要利用高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti 等)、相容元素(Cr、Ni)等不活动元素进行讨论。

辉长岩具有低的 SiO_2 (45.91%~46.77%),中等—高的 MgO (8.47%~9.16%)和 $\text{Mg}^\#$ (59.1~60.5),以及低的 Cr($3.99\times 10^{-6}\sim 4.59\times 10^{-6}$)、Ni($118\times 10^{-6}\sim 128\times 10^{-6}$),表明岩石经历了一定程度的橄榄石和辉石的分离结晶作用(表 1)。在球粒陨石标准化图解上无 Eu 异常,表明无斜长石的分离结晶(图 3-a)。在原始地幔标准化图解上,P、Ti 无异常,表明无明显的磷酸盐矿物和铁钛氧化等的分离结晶作用(图 3-b)。岩石的 MgO 含量、 $\text{Mg}^\#$ 值及 Cr 和 Ni 含量不仅与分离结晶作用有关,而且还与地幔性质、部分熔融条件及熔融程度有关。因而,考虑到全岩具有较低的 SiO_2 含量和中等—高的 MgO (8.47%~9.16%)和 $\text{Mg}^\#$,笔者认为岩浆在形成后仅经历了程度不大的橄榄石和辉石的分离结晶作用。

基性岩浆在储存和上升过程中常会受到壳源物质混染。地壳物质富集 LILE、 K_2O 和 Na_2O ,亏损 P_2O_5 和 TiO_2 ;对于基性岩浆,少量的地壳污染即可

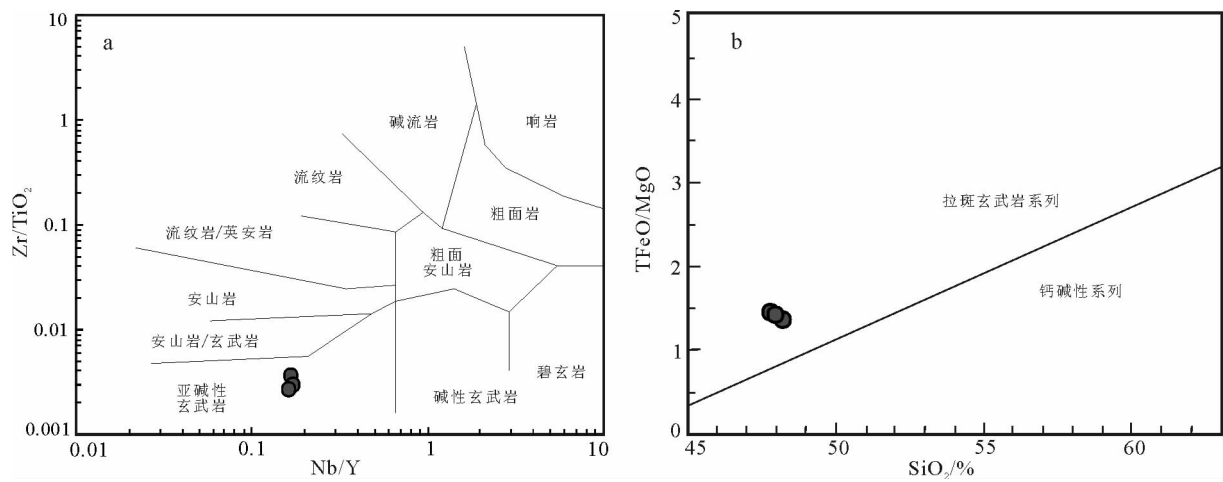


图 2 扬子西缘较平渡基性侵入岩 Nb/Y-Zr/TiO₂(a)和 SiO₂-TFeO/MgO(b)分类图解
Fig. 2 Nb/Y-Zr/TiO₂ (a) and SiO₂-TFeO/MgO classification diagrams (b)
of the mafic intrusions in the western margin of Yangtze Block, South China

导致明显的 Nb、Ta 负异常。在原始地幔标准化图解(图 3-b)上,Rb、Ba 和 Sr 明显为正异常,但 Nb、Ta 没有负异常。因而,Rb、Ba 和 Sr 的正异常不可以简单地解释为地壳物质混染。Rb、Ba 和 Sr 是不相容元素中的活动元素,在热流体中极易活动,它们的正异常很可能是岩石成岩以后受蚀变影响带入导致的,而不是地壳物质混染的结果,主要有以下 6 个方面的证据:①前已述及,辉长岩明显受到了蚀变的影响。②在 Pearce 等^[49]的 MORB 标准化图解(本文未

列出)中,活动元素 Sr、K、Rb 和 Ba 在左侧,从左往右按不相容元素增加的顺序排列;不活动元素在右侧,从右往左按不相容元素增加的顺序排列;辉长岩在该图解中仅有 Sr、K、Rb 和 Ba 显示出相对 MORB 富集,其余元素均在 MORB 自身标准化直线以下,表明仅活动性元素受到了影响而相对富集。③除活动性元素 Sr、Rb 和 Ba 等外,其余元素整体显示出类似 N-MORB 的性质(图3-b)。④全岩具有低的 K₂O (0.74%~0.83%)、LILE 和极低的

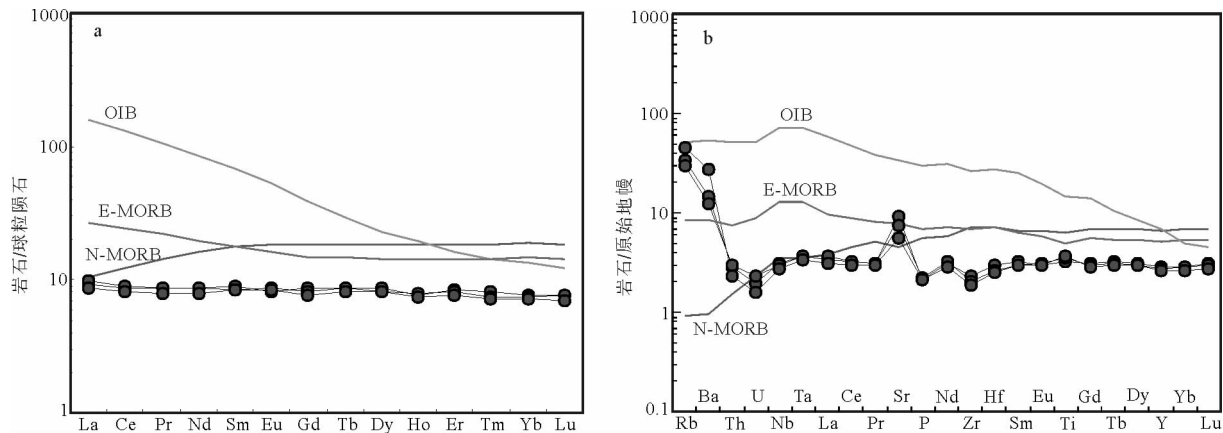


图 3 扬子西缘较平渡基性侵入岩稀土元素配分模式图(a)和微量元素蛛网图(b)
(球粒陨石和原始地幔的值引自参考文献[44];N-MORB、E-MORB 和 OIB 的值引自参考文献[45])
Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagram (b)
for mafic intrusions in the western margin of Yangtze Block, South China
OIB—洋岛玄武岩;E-MORB—富集洋中脊玄武岩;N-MORB—正常洋中脊玄武岩

REE($\sum \text{REE}=20\times 10^{-6}\sim 21.5\times 10^{-6}$)含量,没有Nb、Ta 负异常,无地壳物质混染的特征。⑤无壳源捕获锆石。⑥锆石具有一致的 Hf 同位素(图 6),与基性锆石受地壳混染通常表现出较宽的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 不同。

综上所述,辉长岩的母岩浆经历了程度不大的橄榄石和辉石的分离结晶作用,没有受到地壳混染影响,仅成岩后活动元素受到后期蚀变影响而富集,因而可以用其特征的元素和同位素示踪地幔源区性质。在球粒陨石标准化图解上,辉长岩显示为一条低的、近似平直的线(图 3-a);在原始地幔标准化图解上,除活动元素 Rb、Ba 和 Sr 显示为富集外,其余元素总体显示为一条类似于 N-MORB 的曲线,明显不同于 E-MORB 和 OIB(图 3-b)。辉长岩锆石具有一致且较正的 ε_{Hf} 值,在 1694Ma,锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值几乎与地幔演化线相交;锆石亏损地幔 Hf 模式年龄 t_{DM1} 为 1738~1883Ma,平均值为 1803Ma,只略大于成岩年龄;锆石 Hf 同位素和模式年龄显示出亏损的特征。全岩元素和锆石 Hf 同位素特征表明,辉长岩来自亏损地幔源区。据此,笔者认为在古元古代晚期(约 1700Ma),扬子陆块西缘之下存在一个亏损的地幔。

4.3 扬子陆块西缘存在太古宙结晶基底

扬子陆块西缘康滇南北向构造带的基底问题一直倍受研究者关注。前人根据变质程度、变形特征和年代学数据等认为该区基底存在双层结构,即形成于太古宙—古元古代的结晶基底和其上覆盖的浅变质褶皱基底,前者以康定群和大红山群的深变质岩系为代表,后者以会理群、昆阳群及盐边群等的浅变质岩系为代表^[21, 27, 50]。随着 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 等原位微区测年技术的广泛应用,一大批高精度同位素年代学数据表明,原被认为是太古宙—古元古代结晶基底的康定群主要由新元古代(850~750Ma) 岩浆杂岩组成^[51~55],部分学者据此认为扬子地块西缘不存在太古宙—古元古代的结晶基底^[48, 56]。

在探讨扬子陆块西缘的基底问题时,一个不可忽视的事实是,扬子陆块西缘的元古代地层内普遍含有太古宙和古元古代的锆石。会理拉拉厂地区河口群(变)石英砂岩含有太古宙碎屑锆石(3051Ma、2797Ma、2932Ma 和 2818Ma),此外还有大量古元古代早期的碎屑锆石^[48, 57]。四川冕宁康定杂岩体中含有古元古代早期到晚期的陆壳残留锆石,最老的年龄为 2468Ma^[58]。在会理地区会理群和滇中地区昆阳

表 1 扬子西缘皎平渡辉长岩主量、微量和稀土元素组成
Table 1 Major, trace and rare earth elements compositions of the gabbros in Jiaopingdu district in the western margin of the Yangtze Block, South China

样品号	10JPD03-1	10JPD03-2	10JPD03-3
SiO ₂	46.77	45.91	46.49
Al ₂ O ₃	13.4	13.44	13.18
Fe ₂ O ₃	7.04	6.90	7.63
FeO	5.60	6.10	6.16
CaO	11.02	10.93	9.48
MgO	8.73	8.47	9.26
K ₂ O	0.76	0.74	0.83
Na ₂ O	2.85	2.76	3.10
TiO ₂	0.64	0.68	0.70
P ₂ O ₅	0.043	0.043	0.042
MnO	0.14	0.14	0.16
LOI	2.60	3.01	2.71
Total	99.59	99.12	99.74
Li	31.8	29.6	25.9
Be	0.16	0.14	0.14
Sc	48.3	45.2	46.1
V	200	212	214
Cr	4.43	3.99	4.59
Co	51.2	52.3	53.3
Ni	124	118	128
Cu	36.1	35.3	34.3
Zn	52.9	50.8	68.5
Ga	16.1	16.9	16.3
Rb	19.8	18.0	27.5
Sr	181	151	110
Y	12.0	11.7	11.2
Zr	24.1	21.4	19.7
Nb	2.01	1.97	1.79
Mo	0.13	0.11	0.12
Sn	0.42	0.42	0.41
Cs	0.88	1.59	4.36
Ba	96.5	79.7	179
La	2.16	2.36	2.04
Ce	5.34	5.52	4.94
Pr	0.79	0.80	0.74
Nd	3.91	3.99	3.62
Sm	1.33	1.22	1.23
Eu	0.45	0.48	0.46
Gd	1.70	1.63	1.53
Tb	0.32	0.31	0.30
Dy	2.11	2.02	2.02
Ho	0.42	0.42	0.40
Er	1.35	1.28	1.22
Tm	0.20	0.18	0.18
Yb	1.22	1.21	1.14
Lu	0.18	0.19	0.17
Hf	0.83	0.74	0.72
Ta	0.14	0.13	0.13
Tl	0.081	0.10	0.14
Pb	1.58	0.74	1.81
Th	0.22	0.23	0.18
U	0.040	0.047	0.033
ΣREE	21.5	21.6	20.0

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶,LOI 代表烧失量,Total 表示主量元素总含量

群内发现有大量古—中元古代 (2500~2300Ma、1900~1700Ma 和 1650~1500Ma) 的锆石^[59-60]。东川群因民组砂岩内含有 2.25~2.35Ga、约 2.5Ga 和 2.7~2.9Ga 群组的碎屑锆石,最老的锆石年龄约为 3.7Ga^[28]。此外,郑永飞等^[16]对华南古老地壳物质进行了研究,发现整个华南地区都有太古宙和古元古代的物质(图 1-a),但它们多以碎屑锆石和岩浆岩捕获锆石的形式出现。另一个重要的信息是,这些具有古元古代年龄的锆石 Hf 同位素主要为负值,指示其为早期地壳物质再循环的结果;具有太古宙年龄的锆石 Hf 同位素有负有正,指示扬子西缘在太古宙时期既有地壳物质再循环也有新生地壳的生长^[28, 59]。太古宙—古元古代碎屑锆石或捕获锆石的广泛出现及其锆石 Hf 同位素特征指示太古宙—古元古代存在陆壳组分,它们为扬子陆块西缘后期褶皱基底的形成提供了重要的物质基础。

扬子西缘存在大量不同规模的古元古代晚期的基性岩脉、岩墙等,野外露头上它们一般侵入到中元古代地层且两者一起被震旦纪白云岩不整合覆盖,

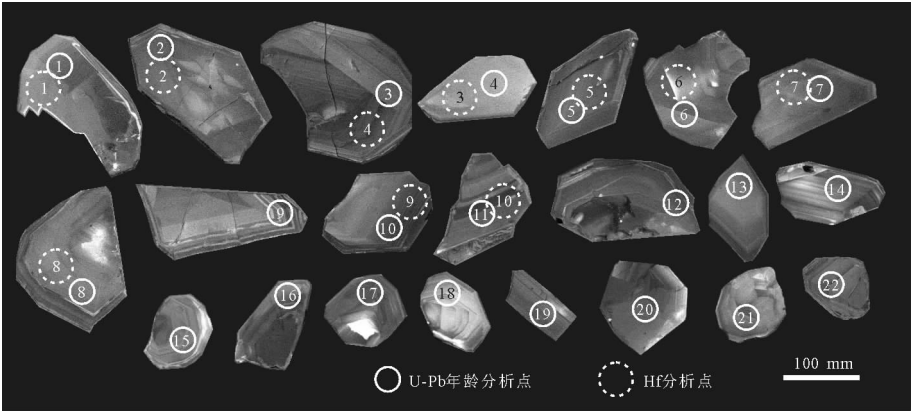


图 4 辉长岩(10JPD03-1)锆石阴极发光(CL)图像及锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素分析点

Fig. 4 CL images of zircons from gabbro (10JPD03-1)

已逐步得到同位素年龄的支持。如,本研究获得四川会理地区侵入到通安组内辉长岩的高质量同位素年龄为 $1694\text{Ma} \pm 16\text{Ma}$;朱华平^[30]和 Zhao 等^[28]分别获得云南东川地区因民组内的辉绿岩脉锆石上交点年龄为 $1667\text{Ma} \pm 13\text{Ma}$ 和 $1692\text{Ma} \pm 32\text{Ma}$;耿元生在会理芭蕉箐获得相似的辉绿辉长岩年龄(私人通讯)。扬子西缘发育大量古元古代的基性岩脉、岩墙,表明该时期扬子陆块地壳已经固化并且具备足够的刚性特征,以致能产生大规模的脆性破裂,进而导致地幔基性岩浆能够沿其侵入形成大量的基性岩脉、岩墙。因而,据此结合太古宙—古元古代碎屑锆石的广泛出

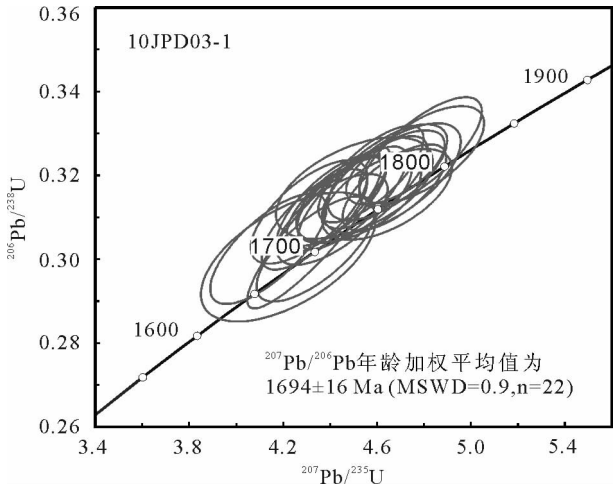


图 5 辉长岩(10JPD03-1)中锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 5 U-Pb concordant diagram of zircons from gabbro (10JPD03-1)

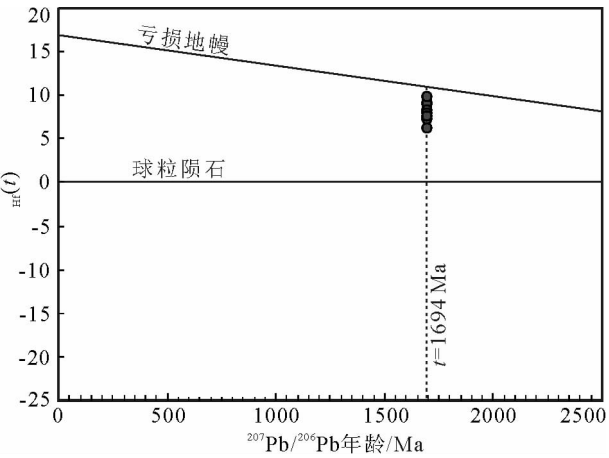


图 6 辉长岩(10JPD03-1)中锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄- $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值图

Fig. 6 Plot of $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age versus $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ of zircons from gabbro (10JPD03-1)

表 3 辉长岩 (10JPD03-1) 锆石 Hf 同位素组成

Table 3 Zircon Hf isotopic compositions of the gabbro (10JPD03-1)

分析点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM1}/Ma
1	0.067761	0.002450	0.282043	0.000008	0.281964	9.2	0.3	1769
2	0.052353	0.001801	0.282018	0.000010	0.281961	9.1	0.4	1773
3	0.038454	0.001457	0.282032	0.000008	0.281985	9.9	0.3	1738
4	0.039160	0.001380	0.281925	0.000009	0.281881	6.2	0.3	1883
5	0.034433	0.001251	0.281980	0.000008	0.281939	8.3	0.3	1801
6	0.042271	0.001395	0.281957	0.000007	0.281912	7.3	0.3	1840
7	0.027332	0.001019	0.281944	0.000009	0.281911	7.3	0.3	1840
8	0.055175	0.001976	0.282045	0.000008	0.281982	9.8	0.3	1743
9	0.072233	0.002525	0.282013	0.000007	0.281932	8.0	0.3	1816
10	0.037064	0.001393	0.281966	0.000006	0.281921	7.7	0.2	1827

现,笔者认为扬子陆块西缘存在太古宙—古元古代的结晶基底,只不过它们或是被地表岩层覆盖而尚未被发现,或是经历了多期构造—热事件被改造,独立的地质实体出露较少。

4.4 Columbia 超大陆裂解作用在扬子陆块的响应

Columbia 超大陆的存在已经得到较为广泛的认可,其最早由 Hoffman^[6]在研究北美与格林兰大陆聚合事件时提出,后被 Rogers 等^[4]命名为“Columbia”,指存在于 Rodinia 超大陆之前的一个古元古代超大陆,时代为2.1~1.8Ga 的全球性造山事件代表了其聚合的主要过程,该期的造山带是各古陆块相互连接的纽带^[63-64]。前人研究表明,扬子陆块存在 1.8~2.0Ga 构造热事件的年代学记录,如凌文黎等^[17]利用 Sm-Nd 法获得崆岭杂岩变质岩系约 1.95Ga 的变质事件年龄;Qiu 等^[14]在崆岭地区奥长花岗岩和副片麻岩的变质锆石中获得了约 1.9Ga 的 SHRIMP 谐和年龄;Zhang 等^[20, 65]和 Wu 等^[66]从崆岭地体的变质岩系中获得 1.9~2.0Ga 的变质事件年龄;此外,大别造山带和湖北京山、湖南宁乡等地也有相似的年龄记录^[67-69]。这些年代学记录揭示出扬子陆块存在 1.9~2.0Ga 的碰撞造山作用,并且可能与 Columbia 超大陆的聚合有关^[20, 67]。

然而,扬子陆块与 Columbia 超大陆裂解有关的地质记录却鲜有报道。熊庆等^[18]和彭敏等^[70]对侵入于湖北宜昌崆岭杂岩中的圈椅墙 A 型花岗岩

(1854Ma±17Ma) 做了详细的年代学和地球化学研究,认为它们是在 Columbia 超大陆聚合之后—裂解之前,扬子北部形成的碰撞造山带在大陆岩石圈的伸展作用下,深部太古宙地壳在后造山的伸展环境中发生拉张垮塌,熔融产生的花岗岩。彭敏等^[19]报道了扬子崆岭高级变质地体古元古代基性岩脉的侵入年龄为 1852Ma±11Ma,认为它们是碰撞后伸展环境下的产物,指示在约 1.85Ga 扬子陆块发生了由碰撞挤压向伸展作用的构造转换。

本文报道的扬子陆块西缘会理地区辉长岩侵位年龄为 1694Ma±16Ma,朱华平^[30]和 Zhao 等^[28]分别报道了东川地区因民组内的辉绿岩脉锆石上交点年龄为 1667Ma±13Ma 和 1692Ma±32Ma,这些年龄明显晚于扬子陆块记录的 Columbia 超大陆形成时碰撞造山事件发生的时间,也晚于由碰撞挤压到伸展构造转换的时间,扬子西缘古元古代晚期广泛发育的基性岩脉、岩墙等,可能是 Columbia 超大陆裂解期地壳在伸展构造环境下,幔源岩浆沿张性断裂侵入的产物,与扬子陆块西缘古元古代晚期基性侵入岩形成有关的幔源岩浆事件,记录了扬子陆块古元古代晚期的一次伸展过程,可能是 Columbia 超大陆裂解作用在扬子陆块的响应。

5 结 论

(1)LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 测年结果表

明, 扬子西缘会理地区其侵入到通安组内的古元古代辉长岩形成于 $1694\text{Ma} \pm 16\text{Ma}$, 限定通安组应为古元古代地层; 结合区域上的同位素年龄数据, 认为会理地区的通安组可与河口群一起置于会理群之下, 并可与东川地区的东川群进行对比。

(2) 全岩元素和锆石 Hf 同位素研究表明, 辉长岩来自亏损地幔源区, 指示在古元古代晚期, 扬子陆块西缘之下存在一个亏损的地幔。

(3) 扬子西缘古元古代晚期的基性岩脉、岩墙广泛存在, 结合扬子西缘大量古老的碎屑锆石, 推测扬子陆块西缘存在太古宙—古元古代的结晶基底。与扬子陆块西缘古元古代晚期基性侵入岩形成有关的幔源岩浆事件, 记录了扬子陆块在古元古代晚期的一次伸展过程, 可能是 Columbia 超大陆裂解作用在扬子陆块的响应。

致谢: 主量元素测试得到西北大学大陆动力学国家重点实验室王建其老师的帮助, 微量和稀土元素测试、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年得到中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室刘勇胜教授、胡兆初教授和陈海红老师的帮助, 锆石 Hf 同位素测试得到西北大学袁洪林教授的帮助, 在此表示衷心感谢。

参考文献

- [1] Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 161: 215–230.
- [2] Zheng Y F, Fu B, Gong B, et al. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: implications for geodynamics and fluid regime[J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 62(1/2): 105–161.
- [3] Jahn B M, Auvray B, Cornichet J, et al. 3.5 Ga old amphibolites from eastern Hebei Province, China: Field occurrence, petrography, Sm-Nd isochron age and REE geochemistry[J]. *Precambrian Research*, 1987, 34(3/4): 311–346.
- [4] Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton[J]. *Geology*, 1992, 20(4): 339–342.
- [5] Liu D Y, Wilde S A, Wan Y S, et al. New U-Pb and Hf isotopic data confirm Anshan as the oldest preserved segment of the North China Craton[J]. *American Journal of Science*, 2008, 308(3): 200–231.
- [6] Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. 3.6 Ga lower crust in central China: New evidence on the assembly of the North China craton[J]. *Geology*, 2004, 32(3): 229–232.
- [7] Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: implications for Paleoproterozoic tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 2000, 103(1/2): 55–88.
- [8] Wang Y J, Zhao G C, Fan W M, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Paleoproterozoic mafic dykes from western Shandong Province: Implications for back-arc basin magmatism in the Eastern Block, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2007, 154(1/2): 107–124.
- [9] Zhai M G, Liu W J. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China craton: a review[J]. *Precambrian Research*, 2003, 122(1/4): 183–199.
- [10] Wan Y S, Song B, Liu D Y, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event[J]. *Precambrian Research*, 2006, 149(3/4): 249–271.
- [11] Peng P, Zhai M G, Ernst R E, et al. A 1.78 Ga large igneous province in the North China craton: The Xiong'er Volcanic Province and the North China dyke swarm[J]. *Lithos*, 2008, 101(3/4): 260–280.
- [12] 翟明国. 克拉通化与华北陆块的形成[J]. *中国科学(D 辑)*, 2011, 41(8): 1037–1046.
- [13] 高山, 张本仁. 扬子地台北部太古宙 TTG 片麻岩的发现及其意义[J]. *地球科学*, 1990, 15(6): 675–679.
- [14] Qiu Y M, Gao S, McNaughton N J, et al. First evidence of >3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of south China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics[J]. *Geology*, 2000, 28(1): 11–14.
- [15] 焦文放, 吴元保, 彭敏, 等. 扬子板块最古老岩石的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. *中国科学(D 辑)*, 2009, 39(7): 972–978.
- [16] 郑永飞, 张少兵. 华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化[J]. *科学通报*, 2007, 52(1): 1–10.
- [17] 凌文黎, 高山, 张本仁, 等. 扬子陆核古元古代晚期构造热事件与扬子克拉通化[J]. *科学通报*, 2000, 45(21): 2343–2348.
- [18] 熊庆, 郑建平, 余淳梅, 等. 宜昌圈椅墙 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素与扬子大陆古元古代克拉通化作用[J]. *科学通报*, 2008, 53(22): 2782–2792.
- [19] 彭敏, 吴元保, 汪晶, 等. 扬子崆岭变质地体古元古代基性岩脉的发现及其意义[J]. *科学通报*, 2009, 54(5): 641–647.
- [20] Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age and Hf-O isotope evidence for Paleoproterozoic metamorphic event in South China[J]. *Precambrian Research*, 2006, 151(3/4): 265–288.
- [21] 李复汉, 谭嘉铭, 申玉连, 等. 康滇地区的前震旦系[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988: 19–160.
- [22] Mathieu L, van Wyk de Vries B, Holohan E P, et al. Dykes, cups, saucers and sills: Analogue experiments on magma intrusion into brittle rocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 271(1/4): 1–13.
- [23] Williams H, Turner S, Kelley S, et al. Age and composition of dikes

- in Southern Tibet: New constraints on the timing of east-west extension and its relationship to postcollisional volcanism[J]. *Geology*, 2001, 29(4): 339–342.
- [24] Nilsson M K M, Söderlund U, Ernst R E, et al. Armitage, Precise U–Pb baddeleyite ages of mafic dykes and intrusions in southern West Greenland and implications for a possible reconstruction with the Superior craton[J]. *Precambrian Research*, 2010, 183(3): 399–415.
- [25] 李江海, 何文渊, 钱祥麟. 古元古代基性岩墙群的成因机制、构造背景及其古板块再造意义[J]. *高校地质学报*, 1997, 3(3): 272–281.
- [26] Kullerød K, Skjerlie K P, Corfu F, et al. The 2.40 Ga Ringvassøy mafic dykes, West Troms Basement Complex, Norway: The concluding act of early Palaeoproterozoic continental breakup[J]. *Precambrian Research*, 2006, 150(3/4): 183–200.
- [27] 辜学达, 刘啸虎, 李宗凡, 等. 四川省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 7–47.
- [28] Zhao X F, Zhou M F, Li J W, et al. Late Paleoproterozoic to early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China: Implications for tectonic evolution of the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*, 2010, 182(1/2): 57–69.
- [29] 孙志明, 尹福光, 关俊雷, 等. 云南东川地区昆阳群黑山组凝灰岩锆石 SHRIMP U–Pb 年龄及其地层学意义[J]. *地质通报*, 2009, 128(7): 896–900.
- [30] 朱华平, 范文玉, 周邦国, 等. 论东川地区前震旦系地层层序: 来自锆石 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测年的证据[J]. *高校地质学报*, 2011, 17(3): 452–461.
- [31] 耿元生, 杨崇辉, 杜利林, 等. 天宝山组形成的时代和形成环境——锆石 SHRIMP U–Pb 年龄和地球化学证据[J]. *地质论评*, 2007, 53(4): 556–563.
- [32] 王冬兵, 孙志明, 尹福光, 等. 扬子地块西缘河口群的时代: 来自火山岩锆石 LA-ICP-MS U–Pb 年龄的证据[J]. *地层学杂志*, 2013, 36(3): 630–635.
- [33] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1/2): 34–43.
- [34] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U–Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1535–1546.
- [35] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt–peridotite interactions in the Trans–North China Orogen: U–Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51: 537–571.
- [36] Ludwig K R. *ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*, Berkeley Geochronology Center[J]. Berkeley, California, 2003.
- [37] Yuan H L, Gao S, Dai M N, et al. Simultaneous determinations of U–Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser–ablation quadrupole and multiple–collector ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 2008, 247(1/2): 100–118.
- [38] DeBievre P, Taylor P D P. Table of the isotopic compositions of the elements[J]. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*, 1993, 123(2): 149–166.
- [39] Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, et al. Hf isotope ratio analysis using multi–collector inductively coupled plasma mass spectrometry: an evaluation of isobaric interference corrections[J]. *Journal of Analytical Atom Spectrometry*, 2002, 17(2002): 1567–1574.
- [40] Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U–Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2006, 234(1/2): 105–126.
- [41] Scherer E, Munker C, Mezger K. Calibration of the lutetium–hafnium clock[J]. *Science*, 2001, 293: 683–687.
- [42] Blichert-Toft J, Albarède F. The Lu–Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle–crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148(1/2): 243–258.
- [43] Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA–MC–ICP–MS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(1): 133–147.
- [44] McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3/4): 223–253.
- [45] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society Special Publications*, 1989, 42: 313–345.
- [46] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U–Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 2004, 49(16): 1859–1604.
- [47] 宋彪, 乔秀夫. 辽北辉绿岩墙(床)群及二道沟组玄武岩锆石年龄及其构造意义[J]. *地学前缘*, 2008, 15(3): 250–262.
- [48] 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 等. 扬子地台西缘变质基底演化[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1–202.
- [49] Pearce J A, Hawkesworth C J, Norry M J. Role of the sub–continental lithosphere in magma genesis at active continental margins [M]. Shiva Publ., Nantwich, 1983: 230–249.
- [50] 冯本智, 等. 康滇地区前震旦纪地质与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 1–202.
- [51] 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 等. 扬子地台西缘新元古代 TTG 的厘定及其意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2006, 25(4): 273–281.
- [52] 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 等. 扬子地台西缘康定群的再认识: 来自地球化学和年代学证据[J]. *地质学报*, 2007, 81: 1562–1577.
- [53] 刘文中, 徐士进, 王汝成, 等. 攀西麻粒岩锆石 U–Pb 年代学: 新元古代扬子陆块西缘地质演化新证据[J]. *地质论评*, 2005, 51(4): 470–476.
- [54] Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, et al. SHRIMP U–Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc–magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 196(1/2): 51–67.
- [55] Zhao J H, Zhou M F, Yan D P, et al. Zircon Lu–Hf isotopic constraints on Neoproterozoic subduction–related crustal growth along the western margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Precambrian Research*, 2008, 163(3/4): 189–209.

- [56]耿元生, 杨崇辉, 王新社, 等. 扬子地台西缘结晶基底的时代[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 429-441.
- [57]Greentree M R, Li Z X, Li X H, et al. Late Mesoproterozoic to earliest Neoproterozoic basin record of the Sibao orogenesis in western South China and relationship to the assembly of Rodinia[J]. Precambrian Research, 2006, 151(1/2): 79-100.
- [58]陈岳龙, 罗照华, 赵俊香, 等. 从锆石 SHRIMP 年龄及岩石地球化学特征论四川冕宁康定杂岩的成因[J]. 中国科学(D 辑), 2004, 34(8): 687-697.
- [59]Sun W H, Zhou M F, Gao J F, et al. Detrital zircon U - Pb geochronological and Lu-Hf isotopic constraints on the Precambrian magmatic and crustal evolution of the western Yangtze Block, SW China[J]. Precambrian Research, 2009, 172(1/2): 99-126.
- [60]Sun W H, Zhou M F, Yan D P, et al. Provenance and tectonic setting of the Neoproterozoic Yanbian Group, western Yangtze Block (SW China)[J]. Precambrian Research, 2008, 167(1/2): 213-236.
- [61]Hoffman P F. Speculations on Laurentia's first gigayear (2.0 to 1.0 Ga)[J]. Geology, 1989, 17(2): 135-138.
- [62]Rogers J J W, Santosh M. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic Supercontinent[J]. Gondwana Research, 2002, 5(1): 5-22.
- [63]Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup[J]. Earth-Science Reviews, 2004, 67(1/2): 91-123.
- [64]Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Review of global 2.1~1.8Ga orogens: implications for a pre-Rodinia supercontinent[J]. Earth-Science Reviews, 2002, 59(1/4): 125-162.
- [65]Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon isotope evidence for ≥ 3.5 Ga continental crust in the Yangtze craton of China[J]. Precambrian Research, 2006, 146(1/2): 16-34.
- [66]Wu Y B, Gao S, Gong H J, et al. Zircon U-Pb age, trace element and Hf isotope composition of Kongling terrane in the Yangtze Craton: refining the timing of Palaeoproterozoic high-grade metamorphism[J]. J. metamorphic Geol., 2009, 27: 461-477.
- [67]Wu Y B, Zheng Y F, Gao S, et al. Zircon U - Pb age and trace element evidence for Paleoproterozoic granulite-facies metamorphism and Archean crustal rocks in the Dabie Orogen[J]. Lithos, 2008, 101(3/4): 308-322.
- [68]Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Widespread Archean basement beneath the Yangtze craton[J]. Geology, 2006, 34(6): 417-420.
- [69]Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age and Hf isotope evidence for 3.8 Ga crustal remnant and episodic reworking of Archean crust in South China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 252(1/2): 56-71.
- [70]Peng M, Wu Y B, Gao S, et al. Geochemistry, zircon U - Pb age and Hf isotope compositions of Paleoproterozoic aluminous A-type granites from the Kongling terrain, Yangtze Block: Constraints on petrogenesis and geologic implications[J]. Gondwana Research, 2011,. doi:10.1016/j.gr.2011.08.012.
- ①四川省地质局第一区域地质测量队. 1:20 万会理幅区域地质测量报告.1970.