

庞维华, 任光明, 孙志明, 等. 扬子地块西缘古—中元古代地层划分对比研究: 来自通安组火山岩锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. 中国地质, 2015, 42(4): 921-936.

Pang Weihua, Ren Guangming, Sun Zhiming, et al. Division and correlation of Mesoproterozoic strata on the western margin of Yangtze block: Evidence from the U-Pb age of tuff zircon in the Tongan Formation[J]. Geology in China, 2015, 42(4): 921-936(in Chinese with English abstract).

扬子地块西缘古—中元古代地层划分对比研究: 来自通安组火山岩锆石 U-Pb 年龄的证据

庞维华 任光明 孙志明 尹福光

(中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要:通安组作为扬子地块西缘最古老的基底地层之一,是前人通过 1.8 Ga 最大沉积时限的碎屑锆石年龄和第三段已获得辉绿岩 1.5 Ga 的侵入年龄来限定的;但未见其更精确地层年龄的相关报道。笔者以通安组一段和四段地层中发现的火山岩样品为研究对象,采用 LA-ICP-MS 方法对其锆石进行原位微区 U-Pb 测年,获得了通安组一段下部变基性火山岩锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄(1833 ± 2) Ma 和四段底部变凝灰岩锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄(1508 ± 15) Ma。该年龄结果表明:(1)通安组下部层位的沉积时代为 1.8 Ga,基本限定了通安组的最大沉积时限,与东川群因民组、大红山群底部大致相当;(2)通安组四段底部沉积时代为 1.5 Ga,与前人获得的通安组三段及东川群黑山组顶部层位沉积时代大致相当,为同期异相沉积;(3)进一步确定了通安组在地层柱上应位于会理群之下,与东川群、河口群、大红山群为可对比的同期异地相沉积地层。

关键词:会理地区;古—中元古代;通安组;地层划分对比;锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄

中图分类号:P597.3;P534.3

文献标志码:A

文章编号:1000-3657(2015)04-0921-16

Division and correlation of Paleo-Mesoproterozoic strata on the western margin of Yangtze block: Evidence from the U-Pb age of volcanic rock zircon in the Tongan Formation

PANG Wei-hua, REN Guang-ming, SUN Zhi-ming, YIN Fu-guang

(Chengdu Center of Geological Survey, China Geological Survey, Chengdu 610082, Sichuan, China)

Abstract: The Tongan Formation is one of the most ancient basement strata on the western margin of Yangtze block; nevertheless, accurate stratigraphic diagenetic age of this formation has had no related reports yet, with only the intrusion age of ~1.5 Ga from zircon of gabbro-diorite dyke and the oldest deposition time of ~1.8 Ga from detrital zircons. Based on petrographic research and using tuff as the study object, the authors dated the volcanic zircons from meta-basic volcanics volcanics of the lower first period and meta-tuff of the bottom fourth period of the Tongan Formation by using LA-ICP-MS zircon situ U-Pb dating method. As a

收稿日期:2014-06-12;改回日期:2014-10-20

基金项目:青年科学基金项目(41402058)和中国地质调查局地质大调查项目(1212011121110、1212011220401及12120114005301)资助。

作者简介:庞维华,女,1984年生,工程师,现主要从事区域地质调查工作;E-mail: cdwhpang@sina.com。

result,, the authors respectively acquired the $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age of 1833Ma for tuffaceous basic volcanic rock and $1508\pm 15\text{Ma}$ for meta-volcanic tuff. Some conclusions have been reached: (1) $\sim 1.8\text{Ga}$ represents the depositional age of the lower first period, which defines the oldest deposits of the Tongan Formation, consistent with the Dongchuan Group and Dahongshan Group; (2) the depositional age of the bottom fourth period is $\sim 1.5\text{Ga}$, in accord with the ages of the third period of the Tongan Formation and the Heishan Formation of the Dongchuan Group, as shown by data obtained by previous researchers; (3) the authors further define the Tongan Formation, which should be under the Huili Group, in accordance with the Dongchuan, Hekou and Dahongshan groups, as a heteropic product.

Key words: Huili area; Paleo-Mesoproterozoic; Tongan Formation; stratigraphic division and correlation; LA-ICP-MS U-Pb Age of zircon

About the first author: PANG Wei-hua, female, born in 1984, engineer, mainly engages in regional geological survey; E-mail: cdwhpang@sina.com.

扬子地块西缘,传统上称为康滇地轴,呈狭长的南北向带状延伸的构造带,广泛出露变质程度不均的变质沉积岩系,构成了扬子地块西缘前震旦纪变质基底,由此一直备受前寒武纪地质学家的关注^[1-12]。作为该基底岩系的重要组成部分,川西—滇中地区大量发育的中元古代地层,主要由河口群、通安组、东川群、汤丹群、大红山群、会理群及昆阳群为代表的浅变质火山—沉积岩系组成。由于受后期构造变形、断裂分割等影响,本区可分为滇中、会理—会东和东川三个块体,不同块体之间地层系统的时空关系存在着多样的对比关系^[13-14]。进一步加强扬子地块西缘中元古代地层划分对比研究,成为认识其地质历史及演化的重要桥梁,笔者认为更为精准的同位素年代学研究尤为重要。

通安组是20世纪80年代1:20万会理幅的区测中建立的,划分为五段,并归入会理群,后经学者研究认为通安组一至四段基本可与东川群进行对比,并从会理群划分出来^[4,8-9]。Sun et al. (2009)报道了通安组上部砂岩中碎屑锆石的三组同位素年龄,分别为2.5~2.3 Ga, 1.9~1.7 Ga和1.65~1.5 Ga,并认为通安组的最大沉积时限在1.0~0.96 Ga;耿元生(2012)在通安组三段的辉长—闪长岩脉锆石中获得了大约1503 Ma的侵入年龄,在凝灰质粉砂岩中的碎屑锆石获得了1806 Ma的最年轻锆石年龄,并初步将通安组形成时代限定在1.8~1.5 Ga^[16]。笔者结合野外地质考察,对通安组一段和四段火山岩锆石采用LA-ICP-MS U-Pb法获得了一段(1833±2) Ma及四段(1508±15) Ma的地层年龄,确定了通安组的沉积时限为1.8~1.5 Ga,跨国际地层年表中造山纪(Orosirian)、固结纪(Statherian)和盖层纪(Calymmian)的沉积范畴,底部年龄可能比东川群

略老,而沉积上限二者相当^[17]。另外,需要特别指出的是,通安组五段的归属一直比较尴尬,野外均表现为与下四段的断层接触关系,从岩性组合等特征来看,前人一直将其作为与淌塘组相当的层位,而本项目在会东小街地区获得淌塘组变玄武岩约1.0 Ga的岩浆锆石年龄(待发表),并认为原定的整合于青龙山组之上、力马河组之下代表裂谷—深海型沉积的淌塘组火山—沉积岩系^[18]实为与天宝山组相当的地层单元,应归属会理群,故本文认为通安组五段与一至四段可能属于两个完全不同的地层体系。为此,本文所涉及的通安组均指通安组一至四段,五段暂不论述。通安组与河口群、东川群及大红山群共同构成了扬子地块西缘古老变质基底的沉积环境和变质程度的地质单元。本文即是通过阐明通安组更精确的地层时代,进一步对本区中元古代早期地层进行对比研究,并初步建立其年代地层格架。

1 地质背景及采样层位

研究区主要位于四川省会理县通安地区(图1),元古宙基底地层发育广泛,主要为通安组、会理群,被震旦系不整合覆盖。由于地处东西向展布的铜厂顶复背斜,且受后期多期次断裂的影响,野外表现为通安组内部各段以断层接触为主,接触界线不易观察。在对川西地区开展前寒武纪地质调查基础上,为了进一步确定通安组的形成时代,笔者对通安地区,特别是芭蕉箐乡何家湾矿区及皎平渡一带进行了详细的野外地质考察。通安组各段主要岩石组合特征见图2,其详细地层情况前人已有介绍^[16],本文不再赘述,以下仅对采样层位进行描述:

通安组一段在区域上未见底,在何家湾矿区该

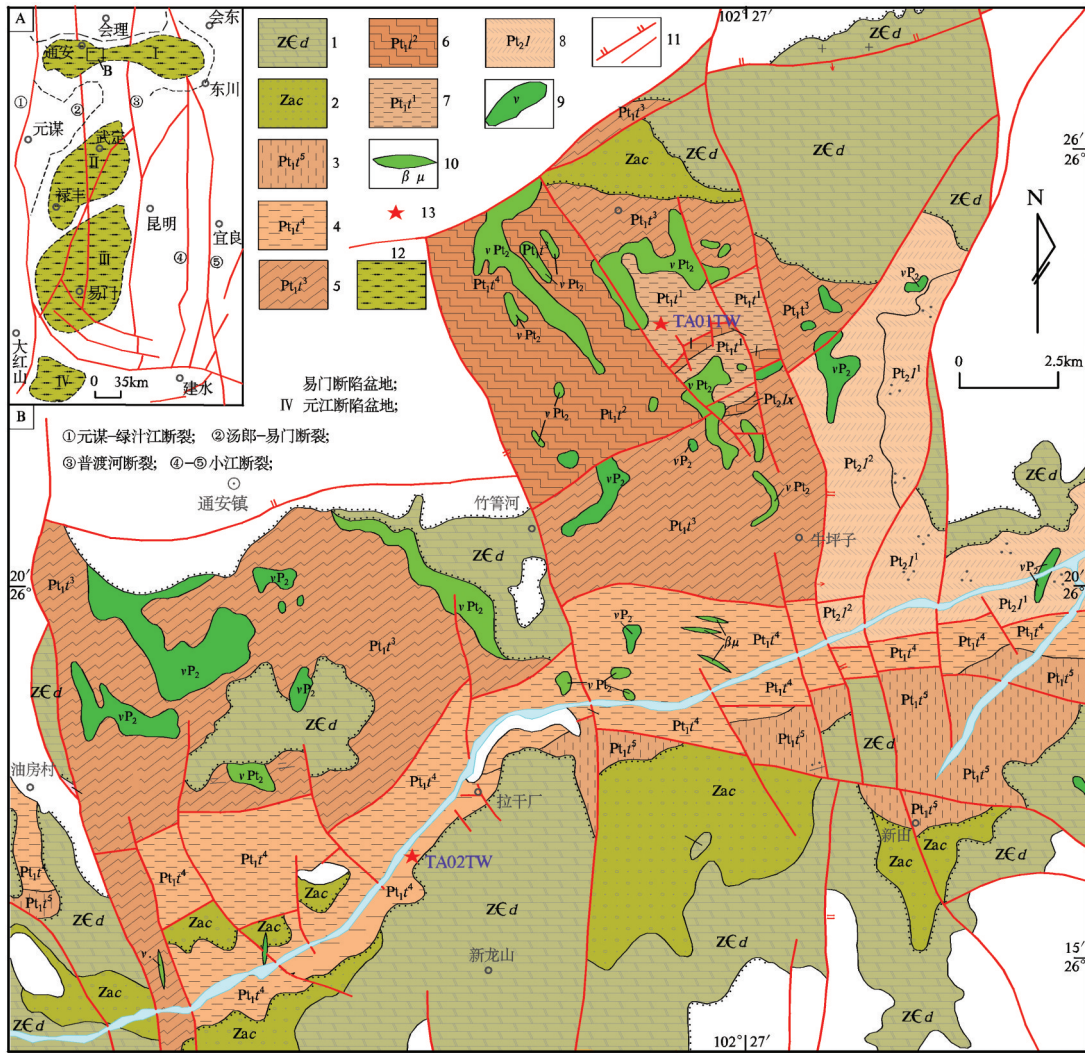


图1 研究区地质简图(据1:25万东川建造图修改)

- 1—震旦系灯影组;2—澄江组;3—通安组五段;4—通安组四段;5—通安组三段;6—通安组二段;7—通安组一段;
- 8—会理群力马河组;9—辉绿岩—辉长岩;10—蚀变玄武岩;11—断层构造;12—断陷盆地;13—采样点

Fig.1 Geological sketch map of the study area (modified after 1:250000 depositional construction map)

- 1—Dengying Formation of Sinian; 2—Chengjiang Formation; 3—The fifth Member of Tongan Formation; 4—The fourth Member of Tongan Formation; 5—The third Member of Tongan Formation; 6—The second Member of Tongan Formation; 7—The first Member of Tongan Formation;
- 8—Limahe Formation of Huili Group; 9—Gabbro—diabase; 10—Melaphyre; 11—Fault; 12—Graben basin; 13—Sampling site

段下部砂板岩中顺层产出一套变基性火山岩,即TA01TW采样层位(图3-c)。砂板岩底部分布一套变质砾岩层(图3-a),砾石成分复杂,既有砂岩、粉砂质岩,也有火山砾石,局部可见向上依次为砾岩、粗砂岩、岩屑砂岩、细砂岩的粒序层理,和水平层理(图3-b1,图3-b2)。该套砾岩与落因盆地分布的因基因组砾岩相似,可以进行对比。

通安组四段(图4)下部在皎平渡一带见约4 m厚的砾岩层,砾石磨圆、分选一般,大小多在1~5 cm

不等,最大可达0.8~1.1 m,小可至mm级,杂基支撑,含凝灰质。砾石成分复杂,主要为灰岩、白云岩、粉砂岩、砂板岩,及基性岩等,砾岩底部见一套蚀变辉石玄武岩,具柱状节理,呈水平展布,与砂岩接触界面可见大量孔雀石,内部可见Fe矿化,向上为石英砂岩及Fe、Si质砂板岩夹少量变凝灰岩,即TA02TW采样位置(图3-d,e;图4),砂板岩中发育叠层石(图3-f)。中部为浅灰、青灰色中厚层至厚层状白云质灰岩及白云岩,夹千枚岩、板岩,局部夹

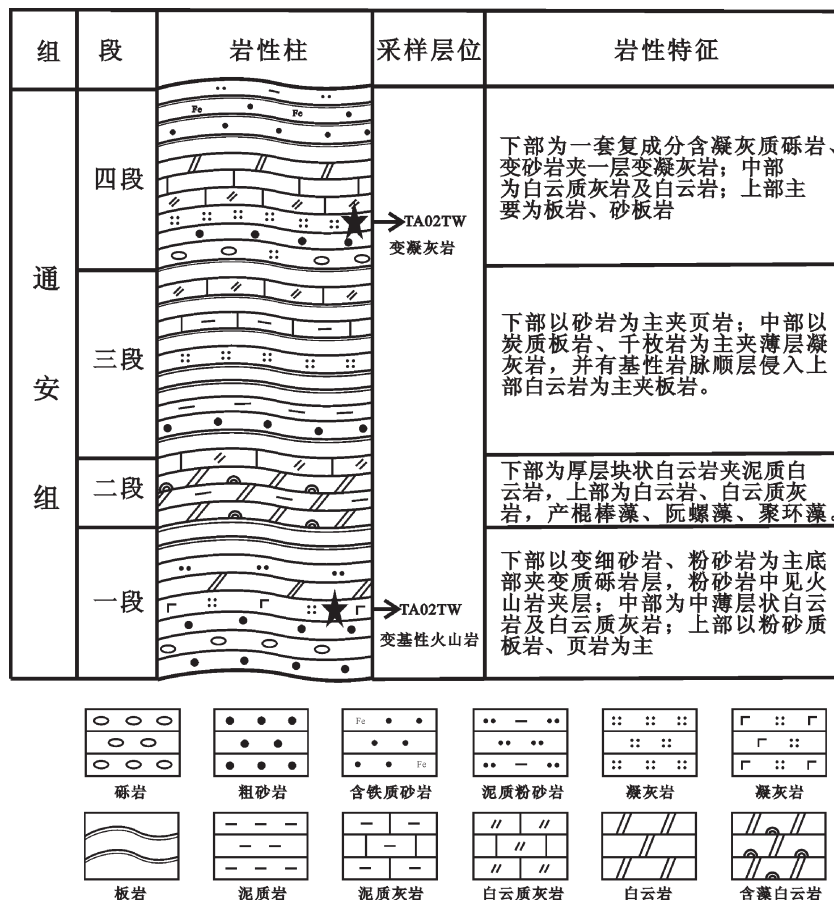


图2 会理地区通安组地层综合柱状图

Fig.2 Stratigraphic column of the Tongan Formation in Huili area

铁质板岩及透镜状赤铁矿，平行层理发育，偶见包卷层理，并发育系列紧闭褶皱。上部主要为炭质板岩、粉砂质板岩夹凝灰质泥岩，局部见石英砂岩。与上覆震旦系灯影组中一厚层状白云岩呈角度不整合接触(图3-g,h)。

2 样品采集及岩相学特征

本次测试样品均选取代表地层成岩年龄的火山岩样品，结合野外地质现象及手标本特征，经显微镜下鉴定后，由河北省廊坊地质调查研究院实验室挑选完成。首先将岩石样品手工粉碎，经常规磁选，然后在双目显微镜下挑选出纯度在99%以上的锆石。

变基性火山岩样品(TA01TW)采于何家湾矿区通安组一段下部(图3-c)，经纬度：N:26°23'40"；E:102°26'57"。岩石风化面为灰褐色，新鲜面为灰白色，中薄层状极细-细粒结构，板状构造，见星点状磁铁矿(图5-a)。显微镜下呈微鳞片状隐晶状结构，有

隐晶状长英质成分，占40%~50%，和微鳞片状定向排列的绢云母(凝灰质变质而来)，占30%~35%，及绿泥石(应为角闪石蚀变而来)，占10%~20%。另有星点状磁铁矿，占5%左右。沿板理充填石英细脉(图5-a)。挑选出的锆石晶型完好，多为无色或淡黄色，透明-半透明，呈柱状或板状自形晶，颗粒粒径长×宽一般为(100~260) μm×(50~100) μm。

变凝灰岩样品(TA02TW)则采自通安镇至皎平渡过桥右侧沿金沙江公路边的通安组四段底部，经纬度：26°16'38"N；102°22'18"E。岩石新鲜面呈灰白-灰-灰绿色，中层极细-细粒条带状，水平纹层极为发育，偶见小型斜层理，较轻微变质(图3-d)。显微镜下呈微鳞片状变晶结构，绢云母呈微鳞片状定向-平行紧密排列，含量>95%，可见少量呈集合体半自形柱状电气石，及极少量微细粒磁铁矿，偶见微小石英(图5-b)。挑选出的锆石多为无色透明，大部分结晶良好，呈短-长柱状半自形晶，少量板状自形晶，颗粒

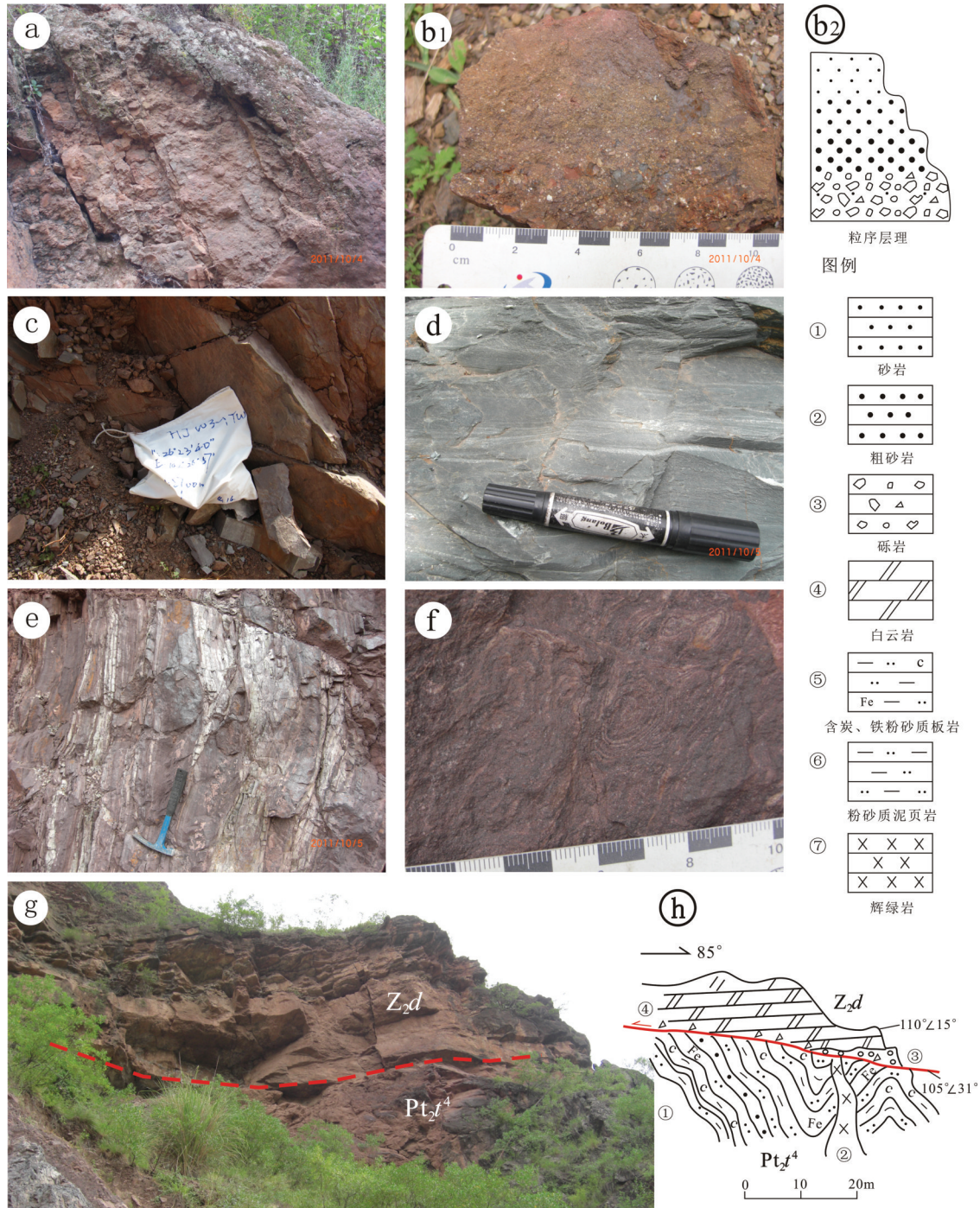


图3 通安地区通安组典型地质特征

a—芭蕉箐地区通安组一段下部砾岩层;b1—通安组一段砾岩中的粒序层理;b2—图b1中粒序层理示意图;c—何家湾矿区通安组一段凝灰质基性火山岩(TA01TW);d—通安组四段变凝灰岩(TA02TW);e—通安组四段下部Fe、Si质砂板岩夹少量凝灰质;f—通安组四段砂板岩中保存的叠层石构造;g—通安组四段和上覆震旦系灯影组白云岩的不整合接触关系;h—图g中不整合接触关系示意图

Fig.3 Geological characteristics of the Tongan Formation in Tongan area

a—Conglomerate layer at the bottom of the first member of Tongan Formation in Bajiaoqing area; b1—Graded bedding of the first member of Tongan Formation; b2—Sketch map of graded bedding in photo of b1; c—Tuff (TA01TW) from the first member of Tongan Formation in the Hejiawan mining area; d—Meta-tuff (TA02TW) from the fourth member of Tongan Formation; e—A small amount of tuffs in the sandy slate of the fourth member of Tongan Formation; f—Stromatolitic structure in the sandstone of the fourth member of Tongan Formation; g—Unconformity between the fourth member of Tongan Formation and the Dengying Formation dolomite of Sinian; h—Sketch map of unconformable contacting relation in Fig. g

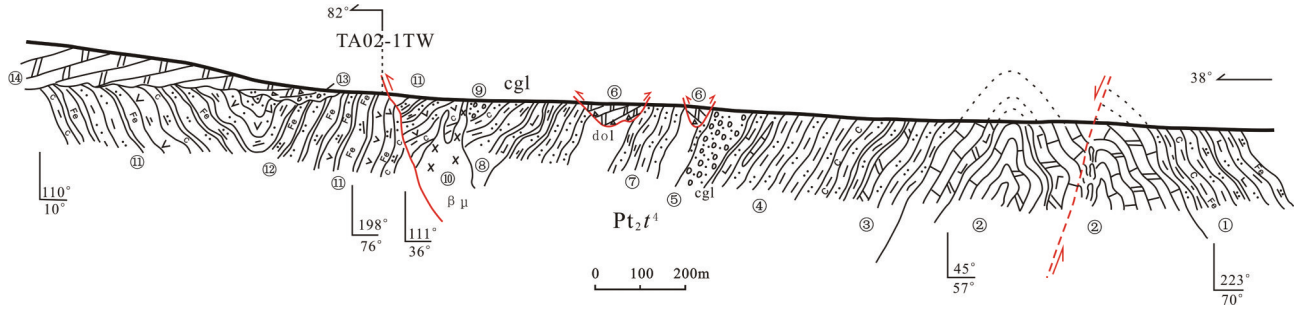


图4 通安镇皎平渡地区通安组四段路线地质调查剖面

- ①—含碳、硅、铁质建造；②—白云岩夹少量板岩、砂板岩及粉砂质板岩，局部糜棱岩化；③—粉砂岩、泥质岩、板岩夹少量砂质碳酸岩；
- ④—粉砂质岩、板岩夹灰岩透镜体；⑤—复成分砾岩；⑥—白云岩；⑦—变粉砂质岩、绢云母板岩；⑧—钙质粉砂岩；⑨—砾岩；
- ⑩—细粒状辉绿岩；⑪—含碳硅质铁质砂岩夹凝灰岩；⑫—铁矿化层；⑬—含砾层；⑭—白云岩

Fig.4 Profiles of the Tongan Formation in Jiaopingdu area of Tongan

- ①—Carbon-silicon-iron-bearing formation; ②—Dolomite with minor slate and silt-slate, mylonitized locally; ③—Siltstone, pelite, slate with minor sandy carbonatite; ④—Siltite, slate with limestone lens; ⑤—Polymictic conglomerate; ⑥—Dolomite; ⑦—Meta-siltite, sericite slate;
- ⑧—Calcareous siltstone; ⑨—Conglomerate; ⑩—Fine-grained diabase; ⑪—Carbon-silicon-iron-bearing sandstone with tuffs; ⑫—Iron mineralization layers; ⑬—Conglomerate-bearing layer; ⑭—Dolomite

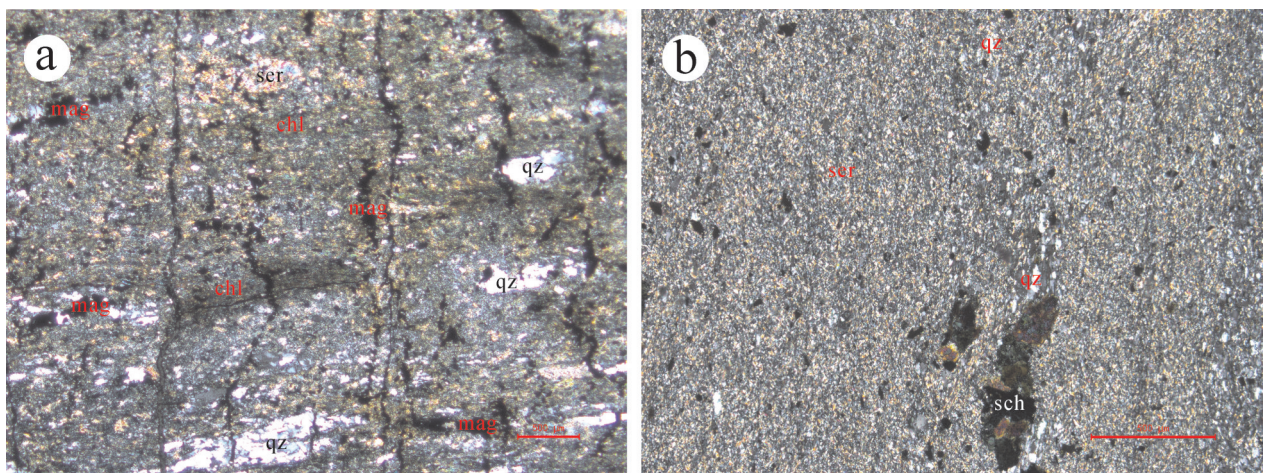


图5 通安组火山岩镜下特征

- a—一段凝灰质基性火山岩；b—四段变凝灰岩；qz—石英；ser—绢云母；chl—绿泥石；mag—磁铁矿；sch—电气石

Fig.5 Characteristics of tuff from Tongan Formation under microscope

- a—Meta-basic volcanics from the first member; b—Meta-tuff from the fourth member; qz—Quartz; ser—Sericite; chl—Chlorite; mag—Magnetite; sch—Tourmaline

粒径长×宽一般为(50~70) μm×(30~60) μm。

3 分析方法

本文对采集的两件同位素样品均采用 LA-ICP-MS 锆石原位微区 U-Pb 测年分析方法。

锆石制靶、显微照相、CL 图像研究在北京离子探针中心扫描电镜实验室完成，首先将待测锆石样品与数粒标准锆石(TEM)置于环氧树脂中，然后磨至约 1/2，使锆石内部新鲜部分暴露，最后制成厚 5~

6 mm、直径约 35 mm 的圆形靶，并抛光，直到样品露出一个光洁的平面，然后进行锆石显微反射光和透射光照相、显微阴极发光(CL)图像研究^[19]。结合透反射及 CL 图像，选择典型的岩浆锆石进行锆石 U-Pb 测年分析，锆石晶体测定位置的选取，尽量避免锆石晶体中的裂纹和包裹体，并避免束斑落于不同时代锆石区域而影响测试结果的准确性。

LA-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 测年工作在国内国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室进行，

测试采用的 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及 Newwave UP213 激光剥蚀系统,激光剥蚀系统能够产生 213 m 的紫外激光,经过激光匀化将能量聚焦在样品表面,采用氦气作为载气,氩气作为补偿气以调节灵敏度。在 25 μm 的剥蚀直径,10 Hz 的频率条件下,采样方式为单点剥蚀,剥蚀深度约 10 μm ,详细实验流程见侯可军,2007,2009^[20-21]。本次测试 TA01TW 样品以 91500 为外标(约 1065 Ma),TA02TW 样品以 GJ-1 为外标(约 607 Ma),测试过程中每测定 8~10 个样品前后重复测定 2 个锆石外标对样品进行校正,并测量 1 个 TEM(约 417 Ma)锆石标样,以保证测试的精确度。U-Th-Pb 同位素比值、年龄计算及元素含量采用软件 ICP-MS-DataCal 完成^[22]。

4 测试分析结果

变基性火山岩和变凝灰岩年龄样品的测年分析结果如表 1 所示。

4.1 通安组一段变基性火山岩锆石分析结果

TA01TW 中锆石的阴极发光(CL)图像特征显示其锆石大致可分为 3 类:(1)呈灰-灰白色半自形-自形板状结构,长短轴之比 1:1~2:1,结构均匀,无分带或仅见弱的生长条带,阴极发光较亮的锆石;(2)呈灰色自形柱状-长柱状颗粒,长短轴之比 1:1~5:1 不等,具有较弱的岩浆生长震荡环带,无继承性核,无变质增生锆石;(3)呈深灰色半自形长柱状为主,多具明显的内部韵律结构及核幔结构,岩浆生长震荡环带较明显,具一定程度的磨圆,可见边部极窄的变质亮边,为典型的捕获岩浆型锆石。

本次研究对 38 粒锆石进行了 39 个点的位置 U-Pb 测年(表 1)。锆石的 Th 含量为 49.1×10^{-6} ~ 7737.9×10^{-6} ,U 含量为 79.6×10^{-6} ~ 3776.7×10^{-6} ,Th/U 比值较高,介于 0.36~4.81,结合 CL 图像,均显示了岩浆锆石成因特征。c 类锆石中部分发生 Pb 丢失(测点 16、17、21、24、26、29、30),其年龄数据组成的不一致线与协和曲线的上交点年龄大致为 2.3 Ga,并获得一组(测点 3、27、28、34、39)集中于谐和线附近的捕获锆石年龄(2270~2382 Ma),其加权平均值为 (2296 ± 40) Ma(2σ , $N=4$, MSWD=14),可能说明了本区通安组一段的沉积物源主要来自于古元古代早期;而浅灰色弱环带结构的捕获锆石给出的

(2705 ± 7) Ma(测点 35)及(1908 ± 8) Ma(测点 22)的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄则分别代表了太古代晚期和古元古代中期的沉积记录。a、b 两组锆石加权平均计算共同得出 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄值为 (1833 ± 2) Ma (2σ , $N=24$, MSWD=4.9),从锆石特征来看,两组锆石颜色深浅、内部结构和晶型各有特色,但均具有火山岩锆石特征的共性,无磨圆、无继承核,且年龄在误差范围内一致,所以排除 b 组锆石为继承性锆石的可能。故笔者认为该锆石加权平均年龄代表了通安组一段的沉积时限,通安组一段成岩年龄为 (1833 ± 2) Ma(图 6)。

4.2 通安组四段变凝灰岩锆石分析结果

TA02TW 中锆石的 CL 图像显示其岩浆生长振荡环带和韵律结构较明显,部分具核幔结构,成分不均一,边部呈白-灰白色,而中心多呈灰-深灰色,Th、U 含量也相对更高,且 Th/U 比值也较大,变化范围为 0.80~6.40(表 1),显然,具备了岩浆成因锆石的特征。测试的 18 个测点均分布在谐和线上或附近,可分为 3 组。第一组是 3 颗具磨圆及灰黑色、灰白色的核幔结构的继承性锆石,幔缘为后期增生边,获得其继承核 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄分别为 (1596 ± 18) Ma(测点 3)、 (1756 ± 17) Ma(测点 18)和 (1682 ± 20) Ma(测点 19),记录了中元古代早期的地质信息。第二组应属后期岩浆热事件过程中形成的变质锆石(测点 2),该锆石呈浅灰-灰白色不规则状,具不明显核幔结构,可能为后期岩浆重熔过程中发生增生,与主晶边界清晰、平直,其边部表面 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 (1062 ± 19) Ma,代表了 1.0 Ga 格林威尔造山期岩浆热事件形成的同时代变质锆石。其余 14 颗灰-浅灰色呈柱状或板状结构,大部分具有岩浆振荡环带或较宽的弱振荡环带的岩浆结晶锆石,为本次测试的主体年龄,均分布于谐和线上,获得 (1508 ± 15) Ma(2σ , MSWD=4.8)的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄加权平均值(图 7),代表通安组四段下部变凝灰岩的形成时代。

5 讨论

5.1 地层时代意义

本次研究,获得的通安组一段变基性火山岩锆石年龄(1833 Ma)和四段底部变凝灰岩锆石年龄(1508 Ma),首次为通安组地层时代提供了精准的年代学证据,标定了通安组在地层柱中的位置(表 2)。

表1 通安地区通安组一段变基性火山岩(TA01TW)和四段变凝灰岩(TA02TW)中锆石U-Pb同位素分析结果
Table 1 U-Pb isotope results of zircons from meta-basic volcanic rocks in the first member (TA01TW) and meta-tuff in the fourth member (TA02TW) of the Tongan Formation in Tongan area

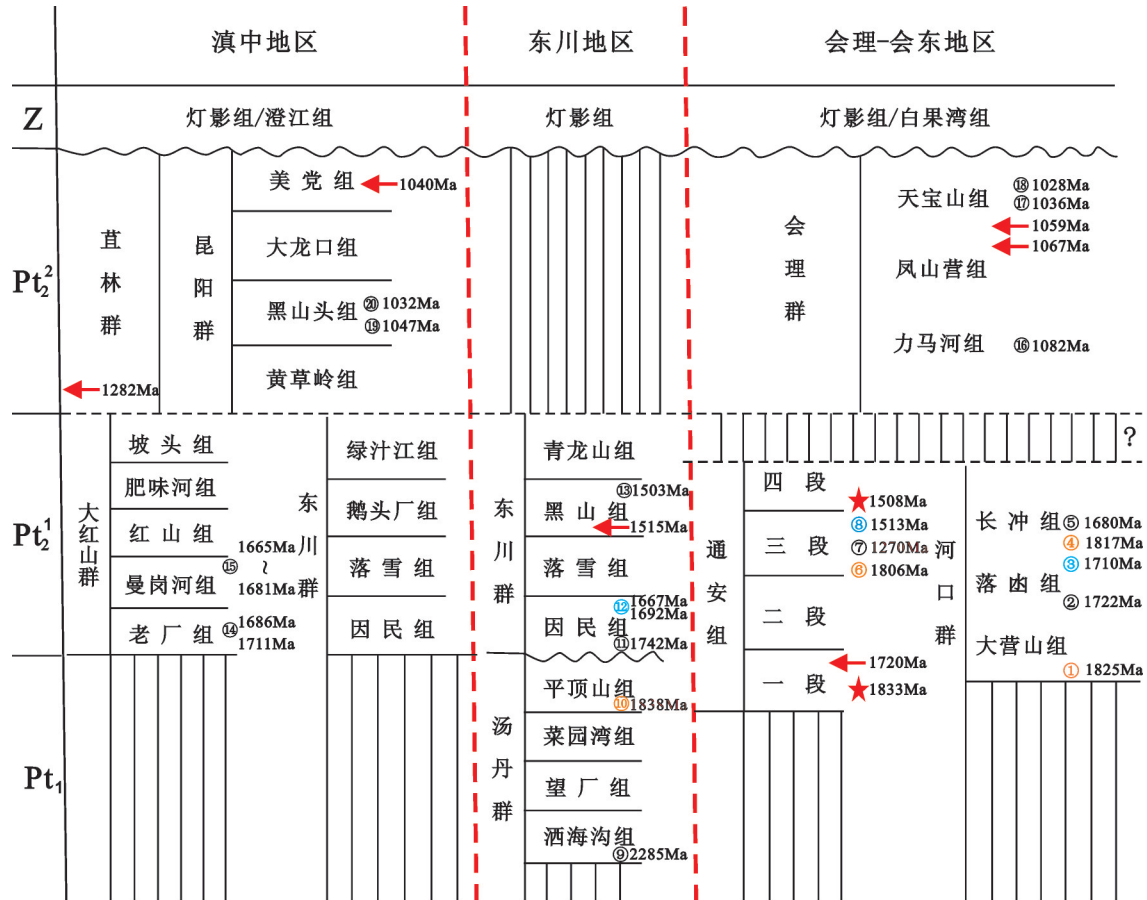
点号	Pb		Th		U		Th/U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		比值		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		视年龄/Ma		谱和度	
	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	1σ	比值	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ		
TA01-01	1986.76	496.34	127.23	89.13	193.73	2.56	1.43	0.11185	0.00076	5.22109	0.03764	0.33854	0.00122	1830	8	1856	6	1880	6	97
TA01-02	515.06	127.23	109.55	189.75	89.13	1.43	0.11109	0.00087	0.00087	5.14594	0.0505	0.33584	0.0015	1817	11	1844	8	1867	7	97
TA01-03	589.01	109.55	100.36	116.89	189.75	0.58	0.14636	0.00086	0.00086	8.72872	0.07283	0.43259	0.0027	2304	7	2310	8	2317	12	99
TA01-04	403.87	100.36	65.21	76.72	116.89	0.86	0.1123	0.00086	0.00086	5.18998	0.04568	0.33526	0.00172	1837	9	1851	7	1864	8	99
TA01-05	248.76	65.21	116.07	64.76	76.72	0.85	0.11262	0.0009	0.0009	5.16815	0.05935	0.33288	0.00277	1842	10	1847	10	1852	13	99
TA01-06	399.55	116.07	92.08	60.11	64.76	1.79	0.10599	0.00133	0.00133	4.76327	0.07482	0.33568	0.00385	1882	12	1867	12	1856	19	101
TA01-07	347.96	92.08	175.44	79.94	79.94	3.51	0.10985	0.00098	0.00098	4.35588	0.05652	0.28765	0.0027	1797	11	1704	11	1630	14	110
TA01-08	407.01	262.04	69.05	34.53	79.94	2.19	0.11102	0.0011	0.0011	4.92264	0.09036	0.32118	0.00408	1816	16	1806	15	1795	20	101
TA01-09	673.5	175.44	1040.8	129.61	65.91	1.97	0.10723	0.00205	0.00205	4.70223	0.09672	0.31804	0.00207	1753	28	1768	17	1780	10	98
TA01-10	190.2	69.05	107.05	84.22	84.22	1.27	0.11107	0.00119	0.00119	4.97401	0.06023	0.32512	0.00302	1817	10	1815	10	1815	15	100
TA01-11	545.68	129.61	62.71	49.44	49.44	1.27	0.11109	0.00134	0.00134	4.9286	0.08102	0.32211	0.00307	1814	17	1807	14	1800	15	101
TA01-12	458.33	107.05	648.41	134.94	134.94	4.81	0.10997	0.00082	0.00082	4.81207	0.10392	0.31713	0.00616	1799	18	1787	18	1776	30	101
TA01-13	263.32	62.71	114.47	3.64	114.47	3.64	0.10913	0.00086	0.00086	4.82615	0.07262	0.32069	0.00403	1785	12	1789	13	1793	20	100
TA01-14	988.41	648.41	470.85	1040.8	329.34	3.16	0.12115	0.00086	0.00086	3.48217	0.0511	0.20832	0.00248	1973	12	1523	12	1220	13	162
TA01-15	599.49	416.32	4094.77	1123.59	1123.59	3.64	0.11467	0.00086	0.00086	2.49592	0.06005	0.15749	0.0032	1875	19	1271	17	943	18	199
TA01-16	470.85	1040.8	195.25	139.24	139.24	1.4	0.10994	0.00094	0.00094	4.77312	0.10084	0.31499	0.00644	1798	17	1780	18	1765	32	102
TA01-17	3470.06	4094.77	47.59	24.81	24.81	1.92	0.11102	0.0028	0.0028	5.17408	0.15248	0.33694	0.00273	1816	42	1848	25	1872	13	97
TA01-18	746.72	195.25	208.8	155.92	155.92	1.34	0.10814	0.00099	0.00099	4.78532	0.09035	0.32085	0.00557	1768	15	1782	16	1794	27	99
TA01-19	138.44	47.59	495.25	304.23	304.23	1.63	0.12632	0.0008	0.0008	4.21331	0.0474	0.24183	0.00227	2047	9	1677	9	1396	12	147
TA01-20	792.65	208.8	154.25	176.65	176.65	0.87	0.11681	0.00075	0.00075	5.58782	0.05421	0.34689	0.00273	1908	8	1914	8	1920	13	99
TA01-21	566.74	495.25	168.99	156.25	156.25	1.08	0.11118	0.00068	0.00068	5.04354	0.08808	0.32714	0.00569	1829	14	1827	15	1824	28	100
TA01-22	662.97	154.25	597.09	736.2	736.2	0.81	0.13993	0.00124	0.00124	5.3143	0.09354	0.27601	0.00546	2226	15	1871	15	1571	28	142
TA01-23	114.45	168.99	759.9	531.34	531.34	0.7	0.131	0.00056	0.00056	4.62432	0.06418	0.25581	0.00318	2111	11	1754	12	1468	16	144
TA01-24	251.35	597.09	49.11	79.63	79.63	0.62	0.14451	0.00057	0.00057	8.42419	0.07305	0.42266	0.0034	2282	7	2278	8	2273	15	100
TA01-25	134.22	174.85	168.17	258.55	258.55	0.65	0.14343	0.00057	0.00057	8.35358	0.08224	0.42222	0.00368	2269	8	2270	9	2270	17	100
TA01-26	211.23	531.34	1575.65	494.55	494.55	3.19	0.12956	0.0005	0.0005	4.18172	0.03827	0.33999	0.00191	2092	7	1670	7	1355	10	154
TA01-27	59.57	49.11	1867.93	411.63	411.63	4.54	0.13334	0.00058	0.00058	2.92878	0.03638	0.15924	0.00182	2142	10	1389	9	953	10	225
TA01-28	6.57E+13	168.17	174.08	103.81	103.81	1.68	0.11381	0.00057	0.00057	5.2641	0.08226	0.33526	0.00472	1861	13	1863	13	1864	23	100
TA01-29	228.28	1575.65	90.47	94.35	94.35	0.96	0.11259	0.00058	0.00058	5.11579	0.1013	0.32945	0.00634	1842	16	1839	17	1836	31	100
TA01-30	135.3	1867.93	9.28E+13	89.95	89.95	1.03	0.11293	0.00064	0.00064	5.16316	0.06926	0.33153	0.00419	1847	11	1847	11	1846	20	100
TA01-31	111	174.08	224.19	128.73	128.73	0.36	0.1479	0.00057	0.00057	8.68984	0.12548	0.42596	0.00598	2322	11	2306	13	2287	27	102
TA01-32	70.68	90.47	145.07	114.17	114.17	1.27	0.18577	0.0008	0.0008	13.06218	0.17098	0.50984	0.00659	2705	10	2684	12	2656	28	102
TA01-33	9.28E+13	89.95	53.43	60.27	60.27	1.12	0.11409	0.00091	0.00091	5.163	0.07903	0.32819	0.00465	1866	12	1847	13	1830	23	102
TA01-34	224.19	128.73	88.08	84.48	84.48	1.04	0.11235	0.00069	0.00069	5.09872	0.05891	0.32902	0.00354	1838	9	1836	10	1834	17	100
TA01-35	128.71	145.07	128.73	175.21	175.21	2.17	0.1532	0.00081	0.00081	8.09938	0.09852	0.38321	0.00441	2382	9	2242	11	2091	21	114
TA01-36	53.43	60.27	777.27	522.59	522.59	1.49	0.11499	0.00072	0.00072	5.23942	0.06494	0.33052	0.00435	1880	11	1859	11	1841	21	102
TA01-37	81.22	88.08	128.47	377.88	377.88	1.49	0.11499	0.00072	0.00072	5.23942	0.06494	0.33052	0.00435	1880	11	1859	11	1841	21	102
TA01-38	128.47	377.88	6.57E+13	777.27	777.27	1.49	0.11499	0.00072	0.00072	5.23942	0.06494	0.33052	0.00435	1880	11	1859	11	1841	21	102
TA01-39	6.57E+13	777.27																		

续表1

点号	Pb		Th		U		Th/U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		谐和度
	/10 ⁻⁶		Th	U	Th/U	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	视年龄/Ma	1σ	视年龄/Ma	
TA02-02	1147.02	558.7	422.46	1.32	0.07474	0.00049	1.80615	0.03844	0.17544	0.0036	1062	19	1048	14	1042	20	1042	20	102
TA02-03	287.73	190.89	47.04	4.06	0.09848	0.00081	3.78997	0.08373	0.27949	0.00577	1596	18	1591	18	1589	29	1589	29	100
TA02-04	488.71	161.13	107.91	1.49	0.09274	0.00046	3.41993	0.04503	0.26791	0.00367	1483	12	1509	10	1530	19	1530	19	97
TA02-05	687.68	226.45	153.82	1.47	0.0929	0.00054	3.45537	0.04264	0.27034	0.00364	1486	11	1517	10	1543	18	1543	18	96
TA02-06	814.13	296.28	165.69	1.79	0.09444	0.00056	3.39974	0.06609	0.26184	0.0056	1517	18	1504	15	1499	29	1499	29	101
TA02-07	1524.24	1328.95	236.26	5.62	0.09445	0.00047	3.47732	0.06687	0.26732	0.00522	1517	17	1522	15	1527	27	1527	27	99
TA02-08	713.31	249.79	150.01	1.67	0.09197	0.00056	3.38224	0.04775	0.26693	0.00378	1467	12	1500	11	1525	19	1525	19	96
TA02-09	646.51	239.45	181.27	1.32	0.09223	0.0006	3.43396	0.0523	0.26991	0.00366	1472	13	1512	12	1540	19	1540	19	96
TA02-10	129.23	40.64	50.72	0.8	0.09384	0.00083	3.45164	0.06229	0.26676	0.00458	1505	15	1516	14	1524	23	1524	23	99
TA02-11	315.08	117.1	71.69	1.63	0.09451	0.00072	3.43505	0.06705	0.26339	0.00489	1518	17	1512	15	1507	25	1507	25	101
TA02-12	1083.71	371.51	210.29	1.77	0.092	0.00057	3.38637	0.04737	0.2667	0.00348	1467	12	1501	11	1524	18	1524	18	96
TA02-13	391.46	138.33	99.31	1.39	0.0925	0.00065	3.4079	0.04634	0.26724	0.00374	1478	12	1506	11	1527	19	1527	19	97
TA02-14	982.35	442.54	174.91	2.53	0.09364	0.0006	3.51139	0.07497	0.27198	0.00579	1501	18	1530	17	1551	29	1551	29	97
TA02-15	428.75	140.1	104.6	1.34	0.09337	0.00065	3.42104	0.05366	0.2657	0.00411	1495	13	1509	12	1519	21	1519	21	98
TA02-16	583.98	733.35	114.57	6.4	0.0965	0.00064	3.48503	0.05393	0.26214	0.00443	1558	14	1524	12	1501	23	1501	23	104
TA02-17	897.89	455.28	111.11	4.1	0.1074	0.00103	4.6205	0.09664	0.31182	0.00583	1756	17	1753	17	1750	29	1750	29	100
TA02-18	237.26	79.09	72.87	1.09	0.0928	0.00086	3.3851	0.07329	0.26476	0.00575	1484	19	1501	17	1514	29	1514	29	98
TA02-19	383.55	304.9	67.84	4.49	0.10318	0.00088	4.37248	0.10148	0.30764	0.00729	1682	20	1707	19	1729	36	1729	36	97

注:本文所有LA-ICP-MS测试年龄值 > 1000Ma, 其谐和度 = $100 * (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \text{ 年龄}) / (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \text{ 年龄})$, 否则, 其谐和度 = $100 * (^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \text{ 年龄}) / (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \text{ 年龄})$ 。

表2 滇中—川西地区中元古代年代地层对比表
Table 2 Division and correlation of Mesoproterozoic strata in central Yunnan—west Sichuan



注：本文中仅对已公开发表和笔者待发表的高精度锆石 U-Pb 年龄进行统计；图表中红色箭头代表本项目所测试待发表数据；红五星代表本文所测试数据；红色圈数字代表已发表碎屑锆石最小年龄；蓝色圈数字代表侵入岩年龄；黑色圈数字代表成岩年龄数据；红色年龄值代表本文认为其准确性有待商榷的年龄值。①石英砂岩 SHRIMP U-Pb^[46]；②石英砂岩 SHRIMP U-Pb LA-ICP-MS U-Pb^[9]；③石英角斑岩^[40]；④辉绿岩 SHRIMP U-Pb^[31]；⑤钠长岩 SHRIMP U-Pb^[37]；⑥凝灰质砂岩 LA-ICP-MS U-Pb^[16]；⑦凝灰岩 SHRIMP U-Pb^[18]；⑧辉绿岩 LA-ICP-MS U-Pb^[16]；⑨熔结凝灰岩 LA-ICP-MS U-Pb^[33]；⑩沉积砾岩 LA-ICP-MS U-Pb^[33]；⑪凝灰岩 LA-ICP-MS U-Pb^[46]；⑫辉绿岩 LA-ICP-MS U-Pb^[33,32]；⑬沉凝灰岩 SHRIMP U-Pb^[17]；⑭变质中性岩 LA-ICP-MS U-Pb^[43]；⑮变基性岩 LA-ICP-MS U-Pb^[43]；⑯凝灰岩 SHRIMP U-Pb^[18]；⑰凝灰岩 SHRIMP U-Pb^[18]；⑱酸性火山岩 SHRIMP U-Pb^[8]；⑲凝灰岩 SHRIMP U-Pb^[18]；⑳凝灰岩 SHRIMP U-Pb^[40]。

随着扬子地块西缘中元古代地层的研究和对比工作的不断深入，特别是对中元古代地层的研究和对比工作取得了一定进展，通安组在地层柱中的位置逐渐明朗化，但关于其年龄的报道相对较少，特别是缺少代表地层时代的相关数据。辜学达(1997)认为通安组的最大沉积时限在 1.0~0.96 Ga^[23]；Sun et al. (2009)^[15]报道了通安组上部砂岩碎屑锆石三组同位素年龄分别为 2.5~2.3 Ga, 1.9~1.7 Ga, 1.65~1.5 Ga, 耿元生等(2012)^[16]通过通安组三段获得的两组碎屑锆石年龄(2336~1868 Ma)及其顺层侵入的辉长-闪长岩脉锆石年龄(1513~1531

Ma), 提出通安组的形成时代为 1.5~1.8 Ga; 王冬兵等(2013)^[12]获得侵入于通安组的辉长岩 1694 Ma 的锆石年龄。本次报道的代表地层时代的火山岩锆石年龄, 其中通安组底部年龄的 1833 Ma, 略老于耿元生等(2012)^[16]报道的通安组三段中 1806 Ma 的最年轻的碎屑锆石年龄, 指示了通安组可能更老的沉积下限; 而通安组四段底部获得的变凝灰岩锆石年龄 1508 Ma 与上述提及的其下部层位(通安组三段)基性侵入岩年龄相比略为年轻, 甚为吻合地代表了通安组四段的成岩年龄, 本文更精确地限定了通安组 1.8~1.5 Ga 的地层形成时代。

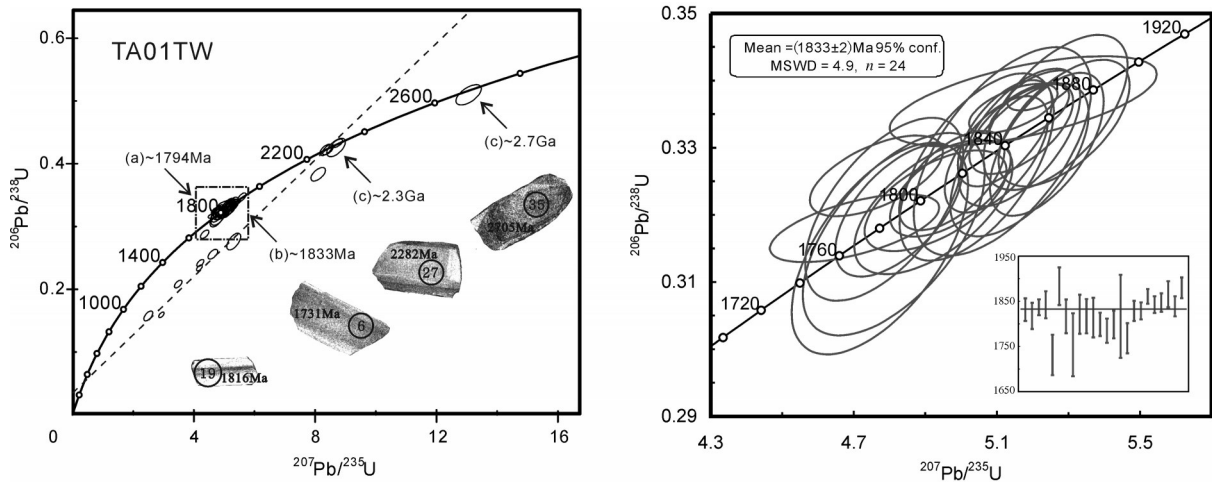


图6 通安地区通安组一段变基性火山岩锆石U-Pb年龄谱和图

Fig.6 Concordia diagrams of zircons from Meta-basic volcanics in the first member of the Tongan Formation

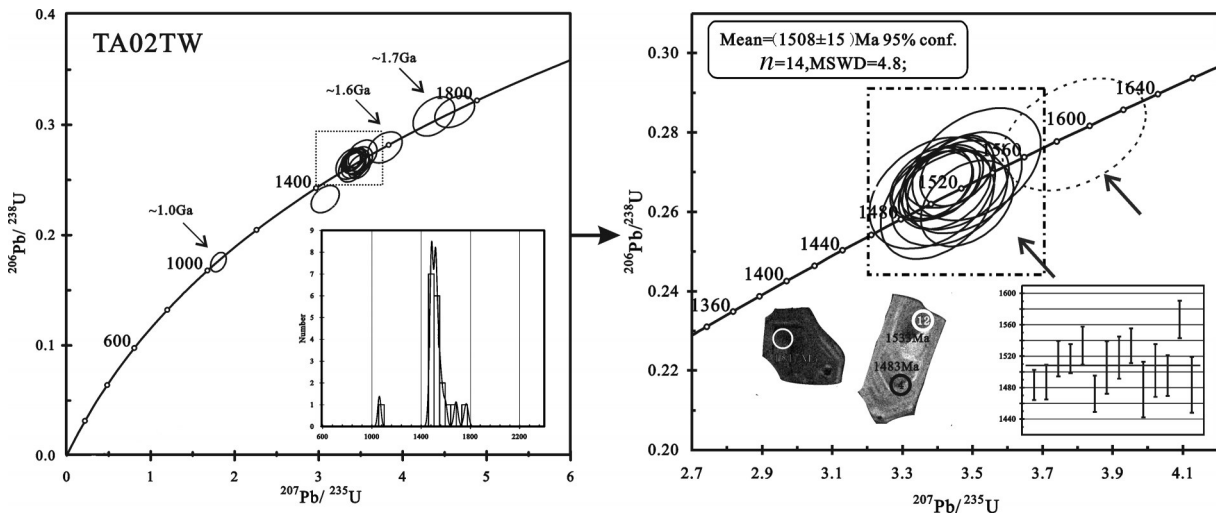


图7 通安地区通安组四段变凝灰岩锆石U-Pb年龄谱和图

Fig.7 Concordia diagrams of zircons from metamorphic tuff in the fourth member of the Tongan Formation

5.2 扬子地块西缘古老结晶基底的存在

扬子地块西缘的基底岩系一直被称为“康滇地轴”，前人根据变质程度、变形特征等认为其为以太古宙—古元古代康定杂岩、渡口杂岩、大红山群、河口群等以角闪岩相变质为主的高—中级变质岩系为主的结晶基底及以会理群、登相营群、峨边群、黄水河群、盐井群等低绿片岩相变质岩系为主的褶皱基底组成的双层基底结构，并最终被震旦系地层不整合覆盖。然而，近年来，随着 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 等锆石 U-Pb 原位微区测年技术的发展和运用，许多高精度同位素年代学数据表明，康定群主要由新

元古代(864~721 Ma)岩浆杂岩组成^[24-30]，尤其是视为古老结晶基底重要证据的沙坝麻粒岩被证明为新元古界的原岩年龄，使得扬子地块西缘是否存在太古宙—古元古代结晶基底的观点受到质疑和挑战。

但是，一大批高精度扬子地块西缘中元古代早期 U-Pb 年代学数据如河口群(1.8~1.7 Ga)、东川群(1.7~1.6 Ga)、大红山群(1.7 Ga)以及通安组(本文)(1.8 Ga)的报道，加之中元古代地层中大量太古宙继承锆石的发育为古老结晶基底的存在提供了强有力的证据。Greentree (2006)^[32] 及耿元生等(2008)^[9] 分别对会理河口地区河口群石英砂岩中的

碎屑锆石进行了锆石 U-Pb 测年,并获得 3050~2797 Ma、2360~2070 Ma、2932 Ma、2818 Ma 的太古宙碎屑锆石;Zhao(2010)^[33]在东川群因民组砂岩中获得了 2.25~2.35 Ga、2.5 Ga、2.7~2.9 Ga,甚至最老 3.7 Ga 的碎屑锆石年龄;朱华平等(2012)^[34]给出了东川汤丹地区可能代表汤丹群底部洒海沟组地层时代的 2285 Ma,以及 2.7 Ga 的上交点年龄、平顶山组碎屑锆石中获得 2.8 Ga 的峰值年龄,特别是 5 颗 3.34~3.78 Ga 的捕获锆石的发现;会理地区通安组出现大量 2.3~2.4 Ga 及部分 2.7 Ga 的锆石;在会理地区会理群和滇中地区昆阳群内发现了 2.3~2.5 Ga 的锆石;以及本项目在苴林群普登组获得一组 2.0~2.5 Ga 的碎屑锆石年龄和元谋地区白岗岩中 2.0 Ga 的捕获锆石年龄;柳小明(2005)报道了扬子地块存在 3.5 Ga 的古老地壳^[35],郑永飞等对华南古老地壳物质进行了综合研究,发现整个华南地区都有太古宙和古元古代的物质存在^[36]。

这些锆石多为碎屑锆石和岩浆岩捕获锆石,指示了太古代基底物质的存在,也说明扬子克拉通存在比崆岭地体更古老、与华北克拉通相当的陆壳物质。而扬子地块西缘的太古宙—古元古代结晶基底无疑是存在的,是由于经历了多期构造岩浆事件的改造或后期剥蚀而殆尽?抑或被后太古宙岩层所覆盖较深尚未被发现还有待进一步研究^[12,35]。

5.3 古-中元古代区域地层对比

由于研究区位于构造活动强烈,变形复杂的扬子地块西缘,褶皱基底地层未以统一基底出现,而是被后期的多期断裂分割成各自独立出露的不同块体和单元,便造成了褶皱基底划分和对比的困难。为此,扬子地块西缘中元古代地层划分对比一直是前寒武纪地质界关注和研究的重点问题之一。笔者以年代学研究为主线,结合岩相学分析对本区川西—滇中地区古-中元古代地层进行对比研究。

河口群为主要出露在会理—黎溪一带的由细碧角斑岩、片岩、大理岩等组成的一套中元古代浅变质火山—沉积岩。刘肇昌(1996)^[6]认为本区河口期原始结晶基底发生裂解,拉拉地区形成近东西向的裂谷盆地,而堆积形成河口群;赵终彻等(1999)及周家云等(2011)对河口群火山岩进行了地球化学分析^[37-38],数据表明河口群为形成于板内裂谷构造环境的一套碎屑—泥质建造和含铜的细碧岩—角

斑岩建造。就目前的同位素年龄数据显示,前人运用 K-Ar, Pb-Pb, U-Pb 等多种同位素方法对河口群的形成时代进行了讨论^[4, 9, 17, 34, 38-39],而近年来应用新方法所获得的 1817 Ma(长冲组)和 1825 Ma 的碎屑锆石年龄,最大限度地限定了河口群的沉积时代,1722 Ma 和 1680 Ma 的火山岩锆石年龄以及 1710 Ma 的辉绿岩侵位时代,大致限定了河口群底界大于 1.68 Ga 的沉积时代,即与通安组底部年龄大致相当。属早元古代晚期次深海盆地(断陷盆地)相火山—沉积地层。

东川群,为一套冲积扇、河口湾相→潮坪相→浅(半深)海盆地相→碳酸盐岩台地相碎屑岩和碳酸盐岩为主的浅变质沉积岩系,代表了一个海平面上升—下降沉积旋回^[41]。最新的测年研究表明东川群属古元古代晚期—中元古代早期,大致相当于国际年表的 Statherian—Calymmian 期^[17-18, 33, 39-42],其底部因民组最年轻的碎屑锆石年龄约为 1780 Ma^[33]与辉绿岩脉的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 上交点年龄(1667±16) Ma^[34]和(1692±32) Ma^[33]以及笔者所获得的东川地区因民组凝灰岩锆石 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄约为 1668 Ma(作者待刊数据),将其最早沉积年龄限制在 1.7 Ga 左右;黑山组沉凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 1503 Ma,及待发表的东川地区黑山组英安岩锆石年龄 1515 Ma,均指示黑山组的形成时代为 1.5 Ga,基本限定了东川群 1.7~1.5 Ga 的沉积时代。同位素年代学数据表明,东川群的最早沉积时间略晚于通安组。

大红山群是一套普遍经历绿片岩相—低角闪岩相的浅变质岩系^[43-46],是中元古代早期形成的东西向断陷盆地中的堆积物,受强烈的区域动热变质作用及区域混合岩化作用,及后期断裂作用经历变形变质而形成的一套绿片岩相—低角闪岩相火山—沉积岩系,与河口群变质程度相当。大红山群的同位素定年取得的成果主要是对曼岗组变火山岩进行测年,得出一系列 1657~1675 Ma 的成岩年龄^[47-49],杨红等(2012)^[45]从变中酸性岩和变基性岩岩浆锆石中分别获得 1711 Ma 和 1686 Ma 的 SHRIMP U-Pb 加权平均年龄。表明了大红山群 1.7 Ga 的盆地开启年龄,稍晚于通安组的沉积时代。

通安组底部发育粒序层理的紫红色砂砾岩指示了冲积扇、河口湾相,向上为滨海相变砂岩—泥质

岩夹少量白云质,并多见水平层理和楔状层理;二段显示为含藻白云岩、泥质白云岩、白云质灰岩组成的碳酸盐岩台地相;三段主要为浅海盆地—深水盆地相变细砂岩、炭质页岩,顶部开始海平面下降,至四段沉积时期,海平面回落,发育浅海盆地—浅滩过渡相碎屑—碳酸盐岩组合,从沉积序列和演变规律来看基本可与东川群进行对比,但沉积时限略早于东川群和大红山群,与河口群相当。

综上,受河口期康滇运动SN向拉张作用,原始结晶基底发生裂解而形成的近东西向裂谷盆地^[9],河口群和通安组大约于1.8 Ga随着盆地的开启而沉积。随着裂谷盆地的进一步发展,1.7 Ga左右滇中地区和东川地区开始接受沉积形成大红山群和东川群。会理群和昆阳群、苴林群年龄多集中在1.0 Ga左右,形成于中元古代晚期,无疑是应置于上述几套地层之上的相当的地层单元。但值得注意的是,通安组和东川群顶部(或上部)地层年龄为1.5 Ga与会理群、昆阳群(1.0 Ga)之间存在0.5 Ga的地层记录,目前尚未发现二者之间上下的直接叠置关系,仍为亟待解决的问题。

由于通安组从底至顶的四套地层单元代表了通安地区中元古代早—中期海平面上升—下降的沉积旋回形成,时间跨约300 Ma,并与上述三套群级(河口群、东川群和大红山群)地层单元对比,本文建议将通安组上升为“群”。即将通安群初步定义为发育在会理通安地区的一套中元古代早期浅变质火山—沉积岩系,时代为1.8~1.5 Ga,由下而上包括其原1~4段并相应升为组级单元(地层名称待定),而通常所说的通安组第五段的地层归属和地层名称有待进一步研究。

6 结 论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示, 变基性火山岩锆石年龄(1833 ± 2) Ma, 限定了通安组的底界年龄, 与河口群大致相当; 变凝灰岩锆石年龄指示了通安组四段底部1508 Ma的沉积年龄, 与东川群黑山组相当, 由此限定了通安组的沉积时限为1.8~1.5 Ga, 属中元古代地层。

(2) 本次测试结果, 结合对川西—滇中地区中元古代地层中存在的古老锆石的统计和分析, 说明本区广泛存在太古宙—古元古代古老地壳物质, 进

一步证实了扬子地块西缘结晶基底的存在。

(3) 以同位素年代学研究为主, 通过区域上川西—滇中地区中元古代地层单元的对比分析, 认为通安组(亦或“通安群”)系与河口群、东川群、大红山群为同时代变质程度不同的地层系统, 这四套地层构成了扬子地块西缘古—中元古代早期的地层格架。其上覆会理群与滇中地区昆阳群及苴林群构成中元古代中—晚期的地层单元。汤丹群则为迄今扬子地块西缘发现的最古老且仅出露于东川地区位于古元古代沉积地层。

参考文献(References):

- [1] 陈智梁, 陈世瑜. 扬子地块西缘地质构造演化[M]. 重庆: 重庆出版社, 1987: 9-49.
Chen Zhiliang, Chen Shiyu. On the Tectonic Evolution of the West Margin of the Yangzi Block[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1987: 9-49(in Chinese).
- [2] 潘杏南, 赵济湘, 张选阳. 康滇构造与裂谷作用[M]. 重庆: 重庆出版社, 1987: 298.
Pan Xinnan, Zhao Jixiang, Zhang Xuanyang. Tectonics and Rifting in Kangdian Region[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1987: 298 (in Chinese).
- [3] 周铭魁, 刘俨然. 西昌—滇中地区地质构造演化及地史演化[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988: 9-65.
Zhou Mingkui, Liu Yanran. The Geological Tectonic Characteristic and Evolution in Xichang—mid—Yunnan Region[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1988: 9-65 (in Chinese).
- [4] 李复汉, 谭嘉铭, 申玉莲, 等. 康滇地区的前震旦系[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988: 36-161.
Li Fuhan, Tan Jiaming, Shen Yulian, et al. 1988. The Kangdian Region in Presinian[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1988: 36-161(in Chinese).
- [5] 冯本智. 康滇地区前震旦纪地质与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 1-202.
Feng Benzhi. The Presinian Geology and Metallogeny of the Kangdian Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990: 1-202(in Chinese with English abstract).
- [6] 刘肇昌, 李凡友, 钟康惠, 等. 扬子地块西缘构造演化与成矿[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1996: 1-130.
Liu Zhaochang, Li Fanyou, Zong Kanghui, et al. Tectonic Evolution and Mineralization of Western Margin of Yangtze Platform[M]. Chengdu: Electronic Science & Technology University Press, 1996: 1-130(in Chinese).
- [7] 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 等. 扬子地台西缘结晶基底的年代[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 429-441.
Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, et al. Age of

- crystalline basement in Western Margin of Yangtze Terrane[J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(3):429–441(in Chinese with English abstract).
- [8] 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 等. 天宝山组形成时代和形成环境——锆石 SHRIMP U–Pb 年龄和地球化学证据[J]. 地质论评, 2007, 53(4): 556–563.
Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, et al. Chronology and tectonic environment of the Tianbaoshan Formation——new evidence from Zircon SHRIMP U–Pb age and geochemistry[J]. Geological Review, 2007, 53(4): 556–563 (in Chinese with English abstract).
- [9] 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 等. 扬子地块西缘变质基底演化[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1–156.
Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, et al. 2008. Metamorphic Basement Evolution Western Margin of Yangtze Block[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 1–156(in Chinese).
- [10] 尹福光, 王冬兵, 孙志明, 等. 哥伦比亚超大陆在扬子陆块西缘的探秘[J]. 沉积与特提斯地质, 2012, 32(3): 31–40.
Yin Fuguang, Wang Dongbing, Sun Zhiming, et al. Columbia supercontinent: New insights from the western margin of the Yangtze landmass[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2012, 32(3):31–40(in Chinese with English abstract).
- [11] 尹福光, 孙志明, 任光明, 等. 上扬子陆块西南缘早—中元古代造山运动的地质记录[J]. 地质学报, 2012, 86(12): 1917–1932.
Yin Fuguang, Sun Zhiming, Ren Guangming, et al. Geological record of Paleo– and Mesoproterozoic orogenesis in the Western Margin of Upper Yangtze Block[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(12): 1917–1932(in Chinese with English abstract).
- [12] 王冬兵, 尹福光, 孙志明, 等. 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[J]. 地质通报, 2013, 32(4): 617–630.
Wang Dongbing, Yin Fuguang, Sun Zhiming, et al. Zircon U–Pb age and Hf isotope of Paleoproterozoic mafic intrusion on the western margin of the Yangtze Block and their implications[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(4):617–630(in Chinese with English abstract).
- [13] 牟传龙, 林仕良, 周铭魁. 会理—会东及邻区中元古代东川群层序地层分析[J]. 矿物岩石, 2000, 2(1): 38–44.
Mu Chuanlong, Lin Shiliang, Zhou Mingkui. The study of the sequence stratigraphy of the Dongchuan Group during Mesoproterozoic in Huili–Huidong and Dongchuan areas[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2000, 20(1): 38–44(in Chinese with English abstract).
- [14] 牟传龙, 林仕良, 余谦. 四川会理—会东及邻区中元古界昆阳群沉积特征及演化[J]. 沉积与特提斯地质, 2000, 20(1):44–51.
Mu Chuanlong, Lin Shiliang, Yu Qian. Sedimentation and evolution of the Mesoproterozoic Kunyang Group in the Huili–Huidong region, Sichuan and its adjacent areas[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2000, 20(1): 44–51(in Chinese with English abstract).
- [15] Sun Weihua, Zhou Meifu, Gao Jianfeng, 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: 99–126.
- [16] 耿元生, 柳永清, 高林志, 等. 扬子克拉通西南缘中元古代通安组的形成时代——锆石 LA–ICP–MS U–Pb 年龄[J]. 地质学报, 2012, 86(9): 1479–1490.
Geng Yuansheng, Liu Yongqing, Gao Linzhi, et al. Chronology of the Mesoproterozoic Tong’an Formation in southwestern margin of Yangtze Craton: New evidence from Zircon LA–ICP–MS U–Pb ages[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(9): 1479–1490(in Chinese with English abstract).
- [17] 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, 28(7): 896–900.
Sun Zhiming, Yin Fuguang, Guan Junlei, et al. SHRIMP U–Pb dating and its stratigraphic significance of tuff zircons from Heishan Formation of Kunyang Group, Dongchuan area, Yunnan Province, China[M]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(7): 896–900(in Chinese).
- [18] 尹福光, 孙志明, 张璋. 会理—东川地区中元古代地层—构造格架[J]. 地质论评, 2011, 57(6): 770–778.
Yin Fuguang, Sun Zhiming, Zhang Zhang. Mesoproterozoic stratigraphic–structure framework in Huili–Dongchuan Area[J]. Geological Review, 2011, 57(6): 770–778 (in Chinese with English abstract).
- [19] 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 2002, 48(增刊): 26–30.
Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, et al. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. Geological Review, 2002, 48 (supp.):26–30(in Chinese with English abstract).
- [20] 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. LA–MC–ICP–MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2595–2604.
Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, et al. Laser ablation–MC–ICP–MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10): 2595–2604(in Chinese with English abstract).
- [21] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA–MC–ICP–MS 锆石微区原位 U–Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 481–492.
Hou Kejun, Li Yanhe and Tian You–rong. In situ U–Pb zircon dating using laser ablation–multi ion counting–ICP–MS[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(4):481–492(in Chinese with English abstract).
- [22] Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, 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.
- [23] 辜学达, 刘啸虎. 四川省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 7–46.
Gu Xueda, Liu Xiaohu. Lithostratigraphy of Sichuan [M]. Wuhan: China University of Geosciences Publishing House, 1997: 7–46 (in Chinese).
- [24] Zhou Meifu, Yan Danping, 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.
- [25] Li Xianhua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, et al. SHRIMP U–Pb zircon age, geochemistry and Nd isotope of the Guandaoshan pluton in SW Sichuan: Petrogenesis and tectonic significance[J]. Science in China (Series D), 2003, 46 (Supplement): 73–83.
- [26] 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.
Chen Yuelong, Luo Zhaohua, Zhao Junxiang, et al. Petrogenesis and dating of the Kangding complex, Sichuan Province[J]. Science in China (Series D), 2004, 34(8): 687–697 (in Chinese).
- [27] 刘文中, 徐士进, 王汝成, 等. 攀西麻粒岩锆石 UPb 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.
Liu Wenzhong, Xu Shijin, Wang Rucheng, et al. Zircon U–Pb geochronology of granulites in Panzhihua–Xichang area: New evidence for the Neoproterozoic geological evolution in the Western Margin of Yangtze Block[J]. Geological Review, 2005, 51(4): 470–476 (in Chinese with English abstract).
- [28] 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的证据[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1562–1577.
Du Lilin, Geng Yuansheng, Yang Chonghui, et al. New understanding on Kangding Group on Western Margin of Yangtze Block: Evidence from geochemistry and chronology[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(11): 1562–1577 (in Chinese with English abstract).
- [29] 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.
Du Lilin, Geng Yuansheng, Yang Chonghui, et al. The stipulation of Neoproterozoic TTG in western Yangtze block and its significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2006, 25(4): 273–281 (in Chinese with English abstract).
- [30] Zhao Junhong, Zhou Meifu, Yan Danping, 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.
- [31] 关俊雷, 郑来林, 刘建辉, 等. 四川省会理县河口地区辉绿岩体的锆石 SHRIMP U–Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 482–490.
Guan Junlei, Zheng Lailin, Liu Jianhui, et al. Zircon SHRIMP U–Pb dating of Diabase from Hekou, Sichuan Province, China and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(4): 482–490 (in Chinese with English abstract).
- [32] Greentree M R, Li Zhengxiang, Li Xianhua, 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: 79–100.
- [33] Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Li Jianwei, 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.
- [34] 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.
Zhu Huaping, Fan Wenyu, Zhou Bangguo, et al. Assessing Precambrian Stratigraphic Sequence of Dongchuan Area: Evidence from Zircon SHRIMP and LA–ICP–MS Dating[J]. Geological Journal of China Universities, 2011, 17(3): 452–461 (in Chinese with English abstract).
- [35] 柳小明, 高山, 凌文黎, 等. 扬子克拉通 35 亿年碎屑锆石的发现及其地质意义[J]. 自然科学进展, 2005, 15(11): 1334–1337.
Liu Xiaoming, Gao Shan, Ling Wenli, et al. Identification of 3.5 Ga Detrital Zircons from Yangtze craton[J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(11): 1334–1337 (in Chinese with English abstract).
- [36] 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.
Zheng Yongfei, Zhang Shaobing. Formation and Evolution of Precambrian Continental Crust in South China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(1): 1–10 (in Chinese).
- [37] 赵彻终, 刘肇昌, 李凡友. 会理—东川元古代海相火山岩带的特征与形成环境[J]. 矿物岩石, 1999, 19(2): 17–24.
Zhao Chezhong, Liu Zhaochang, Li Fanyou. The characteristics of Huili–Dongchuan Proterozoic marine volcanic rock zone and its tectonic setting[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1999, 19(2): 17–24 (in Chinese with English abstract).
- [38] 周家云, 毛景文, 刘飞燕, 等. 扬子地块西缘河口群钠长岩锆石 SHRIMP 年龄及岩石地球化学特征[J]. 矿物岩石, 2011, 31(3): 66–73.
Zhou Jiayun, Mao Jingwen, Liu Feiyan, et al. SHRIMP U–Pb zircon chronology geochemistry of albitite from the Hekou Group in the Western Yangtze Block[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2011, 31(3): 66–73 (in Chinese with English abstract).
- [39] Zhao Xinfu, Zhou Meifu. Fe–Cu deposit in the Kangdian region, SW China: A Proterozoic IOCG (iron–oxide–copper–gold) metallogenic province[J]. Mineralium Deposita, 2011, 46(7): 731–

- 747.
- [40] 张传恒, 高林志, 武振杰, 等. 滇中昆阳群凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 华南格林威尔期造山的证据[J]. 科学通报, 2007, 52(7): 818-824.
- Zhang Chuanheng, Gao Linzhi, Wu Zhenjie, et al. SHRIMP U-Pb zircon age of tuff from the Kunyang Group in central Yunnan: Evidence for Grenvillian orogeny in South China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(7): 818-824.
- [41] 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, 2012, 36(3): 630-635.
- Wang Dongbin, Sun Zhiming, Yin Fuguang, et al. Geochronology of the Hekou Group on the Western margin of the Yangtze Block: Evidence from zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of volcanic rocks[J]. Journal of Stratigraphy, 2012, 36(3): 630-635(in Chinese with English abstract).
- [42] Li Huaikun, Zhang Chuanlin, Yao Chunyan, et al. U-Pb zircon age and Hf isotope compositions of Mesoproterozoic sedimentary strata on the western margin of the Yangtze massif[J]. Science in China: Earth Sciences, 2013, 156(4): 628-639.
- [43] 钱锦和, 沈远仁. 云南大红山古火山岩铁铜矿[M]. 北京: 地质出版社, 1990:1-183.
- Qian Jinhe, Shen Yuanren. The Dahongshan Volcanogenic Fe-Cu Deposit in Yunnan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990: 1-183(in Chinese).
- [44] 孙克祥, 沈远仁, 刘国庆, 等. 滇中元古宙铁铜矿床[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991:1-25.
- Sun Kexiang, Shen Yuanren, Liu Guoqing. The Iron and Copper Deposits of Proterozoic in the Middle of Yunnan[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991: 1-25(in Chinese).
- [45] 杨红, 刘福来, 杜利林, 等. 扬子地块西南缘大红山群老厂河组变质火山岩的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(9): 2994-3014.
- Yang Hong, Liu Fulai, Du Lilin, et al. Zircon U-Pb dating for metavolcanites in the Laochanghe Formation of the Dahongshan Group in southwest Yangtze Block, and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(9): 2994-3014 (in Chinese with English abstract).
- [46] 杨红, 刘福来, 刘平华, 等. 扬子地块西南缘大红山群石榴白云母长石石英片岩的白云母 $^{40}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$ 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(6):2161-2170.
- Yang Hong, Liu Fulai, Liu Pinghua, et al. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating for muscovite in garnet muscovite-felsic schists of the Dahongshan Group in southwestern Yangtze Block and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(6): 2161-2170 (in Chinese with English abstract).
- [47] Hu Aiqing, Zhu Bingquan, Mao Cunxiao, et al. Geochronology of the Dahongshan Group[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 1991, 10(3): 195-203.
- [48] Greentree M R, Li Zhengxiang. The oldest known rocks in south-western China: SHRIMP U-Pb magmatic crystallization age and detrital provenance analysis of the Paleoproterozoic Dahongshan group[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 33(5-6): 289-302.
- [49] Zhao Xinfu. Paleoproterozoic crustal evolution and Fe-Cu, metallogeny of the western Yangtze Block, SW China[M]. Hongkong: The University of Hongkong, 2010: 1-192.