

扬子地块西、北缘中元古代地层的划分与对比

耿元生, 旷红伟, 柳永清, 杜利林

中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037

内容提要:广泛分布于扬子地块西缘和北缘的中元古代地层经历了强烈的变形和绿片岩相的变质改造。根据形成时代, 该区的中元古代可以识别出两个阶段, 中元古代早期(1.8~1.4Ga)和中元古代晚期(1.4~1.0Ga)。中元古代早期的地层包括大红山群、东川群、河口群和通安组(1~4 段), 中元古代晚期的地层主要由分布在扬子地块西南缘的昆阳群、会理群和分布于扬子地块北缘的神农架群和打鼓石群组成。新的锆石原位定年结果表明, 通安组的凝灰岩形成于 1744 ± 14 Ma 左右, 河口群角斑岩形成于 1659 ± 23 Ma 左右, 侵入会理群天宝山组的辉长辉绿岩形成于 1026 ± 7 Ma 左右。根据岩石组合、形成环境以及年代学资料, 中元古代早期的大红山群、东川群、河口群和通安组(1~4 段)形成时代相近, 地层组成基本相同, 它们都含有与岩浆热液有关的铁氧化物铜金(IOCg)矿床或层状铜矿床(SSC), 都在 1.75~1.45Ga 期间形成于大陆裂解环境。扬子地块北缘的火地垭群也可能属于中元古代早期地层。中元古代晚期地层在扬子地块西缘北缘均有分布, 其中的昆阳群和会理群大体形成于 1.2~1.0Ga, 神农架群和打鼓石群形成于 1.4~1.0Ga, 它们的顶界可能延伸到新元古代早期。在中元古代晚期的地层中含有大量叠层石, 表明它们形成于温暖潮湿的浅海环境。除上述的中元古代晚期地层之外, 云南元谋地区的苴林群、川西的登相营群、通安组五段等也属于中元古代晚期的地层。

关键词:中元古代早期; 中元古代晚期; 地层划分与对比; 锆石年代学; 扬子克拉通西—北缘

扬子地块西缘的康滇地区以及扬子地块北缘神农架—大洪山地区出露大量中元古代地层(本文的中元古代底界以 1.8Ga 为界, NCSC, 2014), 其中的大红山群、河口群和东川群蕴藏有较丰富的铁铜矿床, 一直倍受关注(Wang Kenan, 1982; Li Fuhan et al., 1988; Qian Jinhe et al., 1990; Hu Aiqin et al., 1991; BGMRSC, 1991; Li Xiji et al., 1984; Hua Youren, 1995; Chang Xiangyang et al., 1997; Wang Kaiyuan, 1998; Zhao Chezhong et al., 1999; Lü Shikun et al., 2001; Mu Chuanlong et al., 2000a, 2000b; Zhu Bingquan et al., 2001; Li Zeqin et al., 2003; Zhao et al., 2011; Zhou Meifu et al., 2014)。特别是近 20 年来, 对该区中元古代地层时代及含矿特征等进行了大量研究, 对不同岩群的形成时代、形成的构造环境及成矿背景提出了许多新的认识(Greentree et al., 2006, 2008; Geng Yuansheng et al., 2007a, 2008; Sun Zhiming et al., 2009; Zhao Xinfu et al., 2010, 2011, 2012; Yin Fuguang et al., 2011a, b, 2012a, b; Zhu Huaping et al., 2011a, b; Yang Hong et al., 2012; Wang Dongbing et al., 2012; Chen W T et al., 2013; Wang Wei et al., 2014a, b; Zhou Meifu et al., 2014; Ren Guangming et al., 2014; Pang Weihua et al., 2015; Zhu Weiguang et al., 2016; Li Huaikun et al., 2013a, b, 2016; Qiu Xiaofei et al., 2011; Wang Jian et al., 2013)。但是对于该区中元古代地层的划分还存在不同的认识, 如通安组是与会理群对比(Yin Fuguang et al., 2012a)还是与东川群对比(Ren Guangming et al., 2014)? 河口群是与汤丹群对比(Yin Fuguang et al., 2012a)还是与东川群对比(Wang Wei et al., 2014a)? 因民组、落雪组等是置于东川群(Yin Fuguang et al., 2012a)还是置于会理群(Zhu Weiguang et al., 2016)? 马槽园群与神农架群是上下不整合关系(Li Huaikun et al., 2013b)还是沉积楔状体的接触关系?(Wang Jian et al., 2013)等等。因此有必要对该区中元古代地层的划分, 特别是区域对比进行深入研究。本文是在以往研究基础

注: 本文由国家自然科学基金(41472082)、国家重点研发计划深地资源勘查开采重点专项(No. 2016YFC0601001)、中国地质调查局项目(12120115068901)资助的成果。
收稿日期: 2017-01-19; 改回日期: 2017-05-30; 责任编辑: 黄敏。
作者简介: 耿元生, 男, 1950 年生, 研究员, 长期从事前寒武纪地质研究。Email: ys-geng@cags.ac.cn。

上并结合新的年代学资料,从年代地层角度对该区中元古代地层的划分和对比提出建议。

1 区域地质背景

扬子克拉通是由扬子地块和华夏地块通过 0.90~0.83Ga 的江南造山带(以前曾称为江南隆起带)拼合而成的新元古代克拉通(图 1a)(Zhang Guowei et al., 2013; Zhao Guochun, 2015; Geng Yuansheng, 2015)。太古宙—古元古代的变质岩系(包括变质 TTG 岩系和变质表壳岩系)主要出露在扬子地块北缘的崆岭一带(Qiu Yumin et al., 2000; Gao Shan et al., 2001, 2011; Zhang Shaobing et al., 2006; Chen Kang et al., 2013; Guo Jinliang et al., 2014, 2015; Li Longming et al., 2014),崆岭东邻的湖北钟祥一带也有出露(Wang Zhengjiang et al., 2013, 2015; Zhang Lijuan et al., 2011);在华夏地块北部的八都一带有零星出露(Hu Xiongjian et al., 1991; Gan Xiaochun et al., 1995; Liu Rui et al., 2009; Yu Jinhai et al.,

2009; Zhao Lei et al., 2014)。大量资料表明,以往认为“康滇地轴”上属于太古宙—古元古代(Li Fuhan et al., 1988; BGMRS, 1991; Cheng Yuqi, 1994)的康定群(杂岩)主体形成于新元古代(Zhou Meifu et al., 2002; Geng Yuansheng et al., 2007b, 2008)。目前有确切年代学证据的中元古代地层主要出露在扬子地块的西南缘—西缘和西北缘。中元古代早期地层(>1.4Ga)主要包括大红山群、东川群、河口群等,它们主要分布在扬子地块的西南缘;中元古代晚期的地层(<1.4Ga)主要包括昆阳群、会理群、神农架群、打鼓石群等,它们从扬子地块的西南缘到北缘均有分布(图 1b)。以往研究曾认为在江南隆起带出露较多的中元古代地层(包括四堡群、梵净山群、冷家溪群、溪口群、双溪坞群、平水群等)(Cheng Yuqi, 1994; BGMRGX, 1985; BGMRRHN, 1988; BGMRRJX, 1984; BGMRRZJ, 1989; Li Zhengxiang et al., 2007; Xu Youhua et al., 2008),但近 20 年的高精度锆石年代学研究证明这些岩群形成于新元古代早期(Li Xianhua et

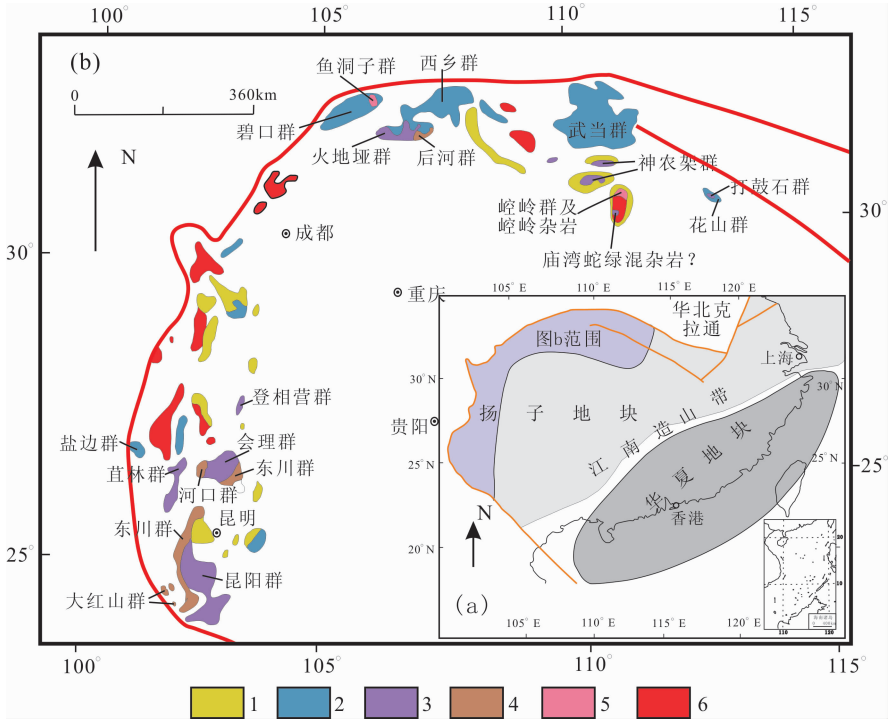


图 1 扬子地块西—北缘中元古代地层分布图

Fig. 1 Sketch geological map showing the distribution of Precambrian geological bodies in the wensren and northern margins of Yangtze Craton

1—新元古代晚期地层, 2—新元古代早期地层, 3—中元古代晚期地层, 4—中元古代早期地层, 5—太古宙—古元古代岩层, 6—新元古代岩浆岩; 图 a 根据 Wu Yuanbao et al., 2012 修改, 图 b 根据 Zhao Guochun, 2015 修改

1—Later Neoproterozoic strata; 2—Early Neoproterozoic strata; 3—Later Mesoproterozoic strata; 4—Early Mesoproterozoic strata; 5—Archean-Paleoproterozoic strata; 6—Neoproterozoic plutons; Fig. a modified from Wu Yuanbao et al., 2012, Fig. b modified from Zhao Guochun. 2015

al., 2009; Chen Zhihong et al., 2009; Shu Liangshu et al., 2011; Wang Xiaolei et al., 2008; Wang Xinshui et al., 2015; Gao Linzhi et al., 2008, 2011a, b; Bai Daoyuan et al., 2010; Zhou Jincheng et al., 2009; Zhang Chuanlin et al., 2015)。

扬子克拉通新元古代地层发育,不论在扬子地块、华夏地块还是在江南造山带都有出露。从形成时代上大体可划分为四套,即青白口纪早期的地层,包括四堡群、梵净山群、冷家溪群、溪口群、双溪坞群、平水群等;青白口纪晚期的地层,包括丹洲群、下江群、板溪群、历口群、河上镇群等,这两套地层主要出露在江南造山带中,它们之间存在较明显的不整合接触关系,造成该不整合的构造运动称为“武陵运动”或“四堡运动”(Gao Linzhi et al., 2011 b; Li Zhengxiang et al., 2002);南华纪地层在扬子地块有较广泛的分布,但是不同地区代表寒冷气候的冰碛岩层数和厚度都有较大的变化(Lan Zhongwu et al., 2015; Zhou Chuanming, 2016);震旦纪地层在扬子克拉通分布较广,其中含有较丰富的古生物化石,大体可与国际上的埃迪卡拉系进行对比。

扬子地块西南缘紧邻三江造山带,受其影响在扬子地块西南—西缘发育大量的近南北走向的断裂,如渡口-大红山断裂、安宁河-绿汁江断裂、汤郎-撮科断裂、小江断裂(图 2)等,这些断裂把中元古代的地层切割错断,不同地点之间的中元古代地层由于断裂破坏出露多不连续,只有通过岩性组合、同位素年龄及古生物化石进行对比。由于以往常用的 K-Ar、Rb-Sr、Sm-Nd 等定年方法的不确定性、藻类化石(叠层石)时间跨度大等原因,所以长期以来一直对一些地层的划分对比存在争议,如滇中地区和东川地区中元古代地层的“正八组”、“倒八组”长期争论(Li Fuhan et al., 1988; Li Xiji et al., 1984; Wu Maode et al., 1990; Dai Henggui, 1997; Lü Shikun et al., 2001)。针对这一问题,全国地层委员会 2009 年组织有关专家对滇中、东川地区原划分的昆阳群进行了实地考察,经考察与研讨,建议将原昆阳群解体为上部的昆阳群和下部的东川群。昆阳群标准剖面位于云南省昆明市西南的易门一带,自下而上分为黄草岭组、黑山头组、富良棚组、大龙口组和美党组,时代暂推定为 1350~1000Ma。东川群的标准剖面位于云南省东川铜矿周边,自下而上包括因民组、落雪组、黑山组和青龙山组,时代暂定为 1600~1350Ma(Lu Songnian et al., 2010)。本

文基本采用全国地层委员会的建议。需要指出的是,东川群不仅限于东川地区。Wu Maode et al. (1990)曾将昆阳群划分为下、中、上三个亚群,其中的下亚群大体相当于现在所划分的东川群,在云南的武定、禄丰一带也出露有昆阳群下亚群,并有大量的铁铜矿床和矿点出露,有迤纳厂式铁铜矿床、东川式铜矿床等,成矿时代为中元古代早期(Yang Yaomin et al., 2005)与大红山和东川地区的成矿有相似性,因此本文的东川群包括了武定、禄丰一带出露的原昆阳群下亚群(图 2)。近年一些研究者根据东川地区因民组底部存在角砾岩等,将东川地区的晒海沟组、望厂组、菜园湾组和平顶山组四个组建立了汤丹群(有人亦称小溜口群)(Yin Fuguang et al., 2011a),并认为东川群不整合于汤丹群之上,二者之间发生的构造运动称为东川运动(Li Fuhan et al., 1988; Yin Fuguang et al., 2011a)。在野外考察的基础上,我们同意暂将东川群置于汤丹群之上。由于汤丹群目前缺少可靠的同位素年龄、汤丹群与东川群的接触关系需更深入的研究,故汤丹群不在本文讨论范围。

2 各岩群的基本特征

扬子地块西缘—北缘分布的中元古代地层可分为中元古代早期的地层,包括大红山群、东川群、河口群和通安组 1~4 段;中元古代晚期的地层,包括昆阳群、会理群(登相营群)、通安组五段、神农架群和打鼓石群,各岩群的分布可参见图 1。

2.1 中元古代早期的地层

2.1.1 大红山群

大红山群西侧紧邻哀牢山-红河剪切带,零星出露于云南省玉溪市新平县的大红山—腰街—漠沙、元江县的撮科等地,周围大部分被古近纪—新近纪、侏罗纪沉积地层所覆盖。自下而上可分为老厂河组、曼岗河组、红山组、肥味河组和坡头组五个组(Qian Jinhe et al., 1990),总厚度超过 3km。老厂河组(厚度 1284m)以变质沉积岩为主,有石榴白云/石英片岩夹斜长角闪岩、大理岩夹炭质泥岩等;曼岗河组(厚度 740m)和红山组(厚度 > 319m)主要以变质火山岩为主,有变质火山角砾岩、凝灰岩等;肥味河组(厚度 259m),以大理岩为主;坡头组主要为含炭质较高的变沉积岩(厚度 577m)。大红山群经历了中低级区域变质作用,变形较强烈,褶皱构造及片理发育,沉积相特征因遭受多期变质和变形而难以保留。虽然如此,Greentree et al. (2008)在该群上

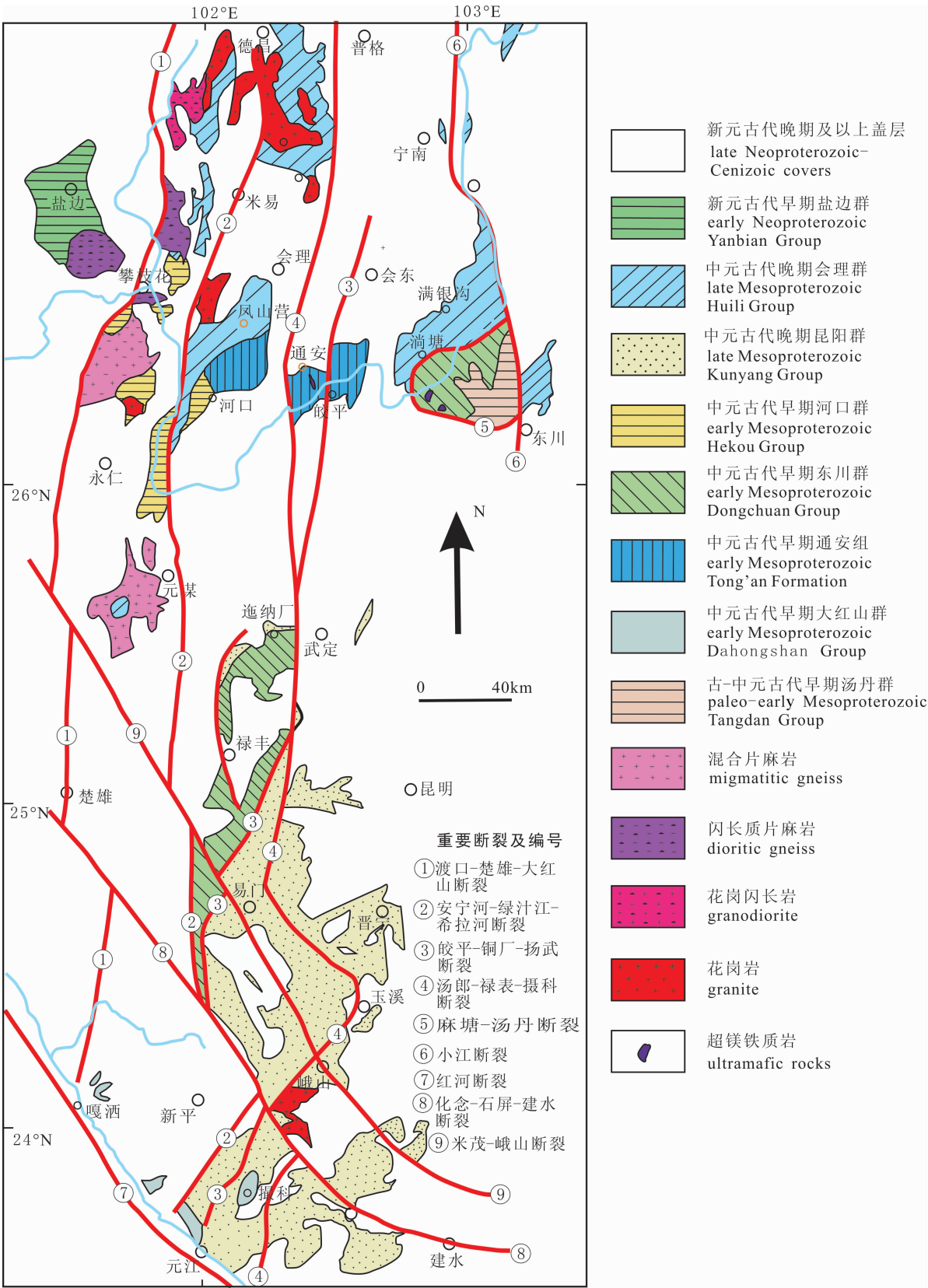


图 2 川滇地区元古代地层分布图

Fig. 2 Distribution of Proterozoic strata in Yunnan-Sichuan provinces

部的坡头组石英岩中发现了交错层理,并在曼岗河组中找到复碎屑变质砾岩,并据此判断大红山群沉积阶段曾处于大陆浅海或泻湖环境。该群中发育有大型的铁铜矿床。

Hu Aiqin et al. (1991)曾用 TIMS 方法获得曼岗河组钠质火山岩锆石 $1665 \pm 14/-11\text{Ma}$ 的 U-Pb 年龄, Greentree et al. (2008)在曼岗河组变凝灰岩中获得 $1675 \pm 8\text{Ma}$ 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄, Zhao Xinfu et al. (2011)在曼岗河组的石英钠长岩和侵入到大红山群中下部的粗玄岩中分别获得了 $1681 \pm 13\text{Ma}$ 和 $1659 \pm 16\text{Ma}$ 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄, Yang Hong et al. (2012)在大红山群最下部的老厂河组石榴长石石英片岩和石榴长石片岩(原岩为中酸性火山岩)中分别获得 $1711 \pm 4\text{Ma}$ 和 $1686 \pm 4\text{Ma}$ 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄, 在该组的斜长角闪岩(原岩为基性火山岩)中获得了 $1722 \pm 19\text{Ma}$ 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 不一致线上交点年龄。这些数据表明大红山群火山沉积作用最早发生在 1722Ma 左右, 属于中元古代早期。

2.1.2 东川群

东川群主要出露在云南东川、武定、禄丰等地, 该群自下而上划分为因民组、落雪组、黑山组和青龙山组四个组, 总厚度超过 2500m (Wu Maode et al., 1990; Dai Henggui, 1997)。因民组主要由灰紫色板岩、砂质白云岩、砂岩组成, 底部含角砾岩。落雪组主要由中厚层白云岩组成, 富含叠层石。黑山组主要由灰绿、黑色炭质板岩组成, 夹凝灰岩、粉砂质硅质板岩。青龙山组主要为一套碳酸盐岩组合。各组地层之间为整合接触。从白云岩中发育的藻礁相、藻席相、藻滩相的特点判断这套白云岩形成于浅海碳酸盐台地相 (Mu Chuanlong et al., 2000a)。在该群的白云岩中发育有 IOCG (iron-oxide-copper-gold) 矿床 (Zhao Xinfu et al., 2011), 如东川的落雪铜矿、滥泥坪铁铜矿、武定的迤纳厂铜矿和鹅头厂铁铜矿等。在因民组底部发育有紫红色角砾岩, 与汤丹群平顶山组之间常为凸凹不平的侵蚀面, 有的研究者认为它们之间应为侵蚀不整合接触 (Yin Fuguang et al., 2011b)。一些玄武岩侵入到东川群中下部。

在武定地区的因民组凝灰岩中获得过 $1742 \pm 13\text{Ma}$ 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 (Zhao Xinfu et al., 2010), 在东川地区黑山组的凝灰岩中获得过 $1503 \pm 17\text{Ma}$ 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 (Sun Zhiming et al., 2009)、 $1504 \pm 5\text{Ma}$ 和 $1500 \pm 4\text{Ma}$ 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 (Li Huaikun et al., 2013a)。另外, 不论在东川地区还是在武定地区, 对侵入到因民一落雪组中的不同脉岩进行了大量的年龄测定, 获得了 10 余个 $1667 \sim 1783\text{Ma}$ 的锆石原位

定年数据 (Zhao Xinfu et al., 2010; Zhu Huaping et al., 2011b; Wang Zizheng et al., 2013; Hou Lin et al., 2013; Guo Yang et al., 2014; Yang Bin et al., 2015) 这些数据表明因民一落雪组形成于 1.7Ga 左右, 属于中元古代早期。黑山组形成于 1.5Ga 左右。

2.1.3 河口群

河口群主要分布在四川省会理县黎溪一河口一带, 自下而上划分为大营山组、落函组和长冲组三个组, 厚度大于 1800m (Li Fuhuan et al., 1988; BGMRS, 1991)。大营山组下部以浅色变质砂岩为主夹白云石英片岩, 中、上部以石英钠长岩为主夹石英片岩。落函组下部以云母石英片岩为主, 夹薄层白云岩和石英钠长岩; 中部以石英钠长岩为主, 夹云母片岩、变石英砂岩及大理岩透镜体, 是黎溪地区最重要的含铜层位; 上部以钠长石英片岩为主, 夹石英钠长岩和云母片岩。长冲组主要由气孔状石英钠长岩、白云钠长片岩、石榴云母片岩、石榴角闪片岩等组成, 夹炭质板岩及含铜大理岩透镜体。每个组基本由下部的变质沉积岩和上部的火山岩组成, 沉积岩通常由含磁铁矿石英岩、粉砂岩、板岩、千枚岩构成沉积韵律 (BGMRS, 1991)。也有的学者将河口群自下而上划分为白云山组、小铜厂组、大团箐组、落函组、新桥组和天生坝组 (Zhou Jiayun et al., 2011; Zhu Zhimin et al., 2013)。火山岩的地球化学特征表明它们形成于大陆的裂解环境 (Chen Genwen et al., 2001)。河口群经历了较低级的变质改造, 变形强烈, 褶皱和片理发育, 一些辉长辉绿岩侵入到该群中 (Guan Junlei et al., 2011)。

前人曾采用全岩 A-Kr、Rb-Sr、辉钼矿 Re-Os 等方法对河口群的形成时代和成矿时代进行过研究 (Gu Xueda et al., 1997; Li Fuhuan et al., 1988; Li Zeqin et al., 2003), 并没有获得可靠的年龄数据, Greentree et al. (2006)、Geng Yuansheng et al. (2008)曾对河口群变沉积岩中碎屑锆石进行过年代学研究, 也未能准确限定河口群的形成时代。Wang Dongbing et al. (2012)获得大营山组钠质火山岩 $1722 \pm 25\text{Ma}$ 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄, Chen W T et al. (2013)采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法在大营山组和落函组变凝灰岩中分别获得了 $1705 \pm 6\text{Ma}$ 、 $1708 \pm 7\text{Ma}$ 和 $1679 \pm 13\text{Ma}$ 的年龄结果。侵入河口群的辉长岩和辉绿岩分别获得了 $1657 \pm 21\text{Ma}$ (Chen W T et al., 2013) 和 $1710 \pm 8\text{Ma}$ (Guan Junlei et al., 2011) 的锆石原位微区的定年结果。

Zhou Jiayun et al. (2011) 获得落幽组钠长岩 $1680 \pm 13\text{Ma}$ 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄, Zhu Zhimin et al. (2013) 获得落幽组凝灰质片岩 $1669 \pm 6\text{Ma}$ 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄, 笔者等最近获得落幽组石英角斑岩 $1659 \pm 23\text{Ma}$ 的锆石 U-Pb 年龄结果 (详见下文)。以上数据表明, 不论是河口群的火山岩 (火山凝灰岩) 还是侵入河口群基性岩的锆石 U-Pb 年龄都显示河口群形成于 $1.7 \sim 1.65\text{Ga}$ 左右, 属于中元古代早期。

2.1.4 通安组 1~4 段

通安组曾作为会理群中的一个组, 后认为通安组的组成和形成时代与会理群有较大差别, 因此独立出来, 但是原来的第五段则划归会理群的力马河组 (BGMRS, 1991)。因此本文的通安组只包括下部的四个段。通安组主要分布在四川会理县通安—会东县南部地区。通安组一段下部为粉砂质板岩, 中部为白云岩和白云质灰岩, 夹粉砂岩, 上部以页岩为主。通安组二段下部主要由白云岩组成, 中部主要由页岩、板岩组成夹大理岩, 上部为砂岩、板岩、页岩夹白云岩。通安组三段下部以粉砂岩—砂岩为主, 中部以板岩为主, 上部以白云岩为主。通安组四段以灰岩和白云岩为主, 夹少量泥质页岩。古地理分析表明, 通安组一段形成于冲积扇—滨海相, 二段形成于碳酸盐台地相, 三段形成于浅海—深海盆地相, 四段形成于浅海盆地—浅滩过渡相 (Pang Weihua et al., 2015)。大量的辉绿辉长岩侵入到通安组中, 在一些侵入体内形成 V-Ti-Fe 矿床。

笔者等 (Geng Yuansheng et al., 2012) 曾根据侵入到通安组三段中辉长辉绿岩 $1513 \sim 1531\text{Ma}$ 锆石 U-Pb 年龄以及三段粉砂岩中最年轻一组碎屑锆石的年龄 (1806Ma) 把通安组形成时代大致限定在 $1.8 \sim 1.5\text{Ga}$ 。Pang Weihua et al. (2015) 在通安组一段基性火山岩和四段的凝灰岩中分别中获得了 $1833 \pm 2\text{Ma}$ 和 $1508 \pm 15\text{Ma}$ 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄, Su Wenbo (2016) 对 $1833 \pm 2\text{Ma}$ 的年龄结果从 4 个方面提出了质疑, 认为该结果“很有可能属于早期岩浆残余体所致”, 最好不予采用。Ren Guangming et al. (2014) 在侵入通安组一段的斜长角闪岩中获得了 $1720 \pm 7\text{Ma}$ 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄。对侵入通安组的辉长岩进行了大量的年代学研究, 获得了 $1694 \pm 16\text{Ma}$ (Wang Dongbing et al., 2013) 和 $1494 \pm 6\text{Ma}$ (Fan Hongpeng et al., 2013) 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄以及 $1490 \pm 4\text{Ma}$ 、 $1486 \pm 3\text{Ma}$ 的 LA-ICP-MS 斜锆石 U-Pb 年龄

(Fan Hongpeng et al., 2013)。笔者最近在通安组下部的凝灰岩中获得了 $1744 \pm 14\text{Ma}$ 的锆石 U-Pb 年龄 (详见下文)。以上数据表明通安组 1~4 段形成于 $1.75 \sim 1.5\text{Ga}$ 左右, 属于中元古代早期。

2.2 中元古代晚期的地层

2.2.1 昆阳群

昆阳群是扬子地块西南缘使用广泛但较为混乱的一个岩石地层单元。Wu Maode et al. (1990) 将昆阳群划分为三个亚群, 下亚群包括因民组、落雪组、鹅头厂组和绿汁江组, 中亚群包括大营盘组、黑山头组、大龙口组和美党组, 上亚群包括柳坝塘组和华家菁组。如前述, 本文将下亚群基本划归东川群, 而目前的资料表明上亚群应为新元古代地层 (Gao Linzhi et al., 2015), 因此文本的昆阳群只包括滇中地区原来划分的昆阳群中亚群。由于大营盘位于东川地区, 因此根据 Li Fuhuan et al. (1988) 的意见将昆阳群最下部的组称为黄草岭组。本文的昆阳群自下而上包括黄草岭组、黑山头组、大龙口组和美党组。黄草岭组主要由灰绿及黑色千枚状板岩和粉砂岩组成。黑山头组下部主要为石英岩、板岩、长石石英砂岩间夹硅质板岩, 上部为中基性凝灰岩, 夹少量板岩 (上部也称富良棚段)。大龙口组为薄层及中厚层状白云岩、灰岩。美党组为灰绿色板岩夹少量粉砂岩、泥质粉砂岩, 下部夹透镜状灰岩、白云岩。Greentree et al. (2006) 曾根据一套火山岩建立老吾山组 (Laowushan Formation), 根据岩石组合和分布我们判断大致相当于黑山头组上部的富良棚段。昆阳群总厚度大于 5000m 。根据沉积组合和组构判断, 黄草岭组形成于稳定浅海环境, 黑山头组形成于陆缘海槽环境, 大龙口组形成于开阔海槽环境, 而美党组形成于水体深度和水动力条件多变的环境 (Wu Maode et al., 1990)。

由于只有在黑山头组的富良棚段含有凝灰岩或火山岩所以对昆阳群的定年近年来主要集中在富良棚段。Greentree et al. (2006) 在黑山头组凝灰岩和他所建立的老吾山组凝灰岩中分别获得了 $1001 \pm 22\text{Ma}$ 和 $1142 \pm 16\text{Ma}$ 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄。在富良棚段凝灰岩中还获得了 $1032 \pm 9\text{Ma}$ (Zhang Chuanheng et al., 2007)、 $1047 \pm 15\text{Ma}$ (Yin Fuguang et al., 2011a)、 $1031 \pm 12\text{Ma}$ (Yin Fuguang et al., 2012a) 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄以及 $1043 \pm 7\text{Ma}$ (Li Huaikun et al., 2013a) 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄。这些年龄均来自昆阳群较上部层位的黑山头组富良棚段, 表明富良棚段火山岩

及火山凝灰岩形成于中元古代晚期,亦表明昆阳群主要形成于中元古代晚期。

2.2.2 会理群

会理群主要出露在川西南的会理、会东地区。最初会理群包括了河口组、通安组、力马河组、凤山营组和天宝山组(BGMRSC, 1991),而 Li Fuhan et al. (1988)则认为会理群只包括力马河组、凤山营组和天宝山组,本文采用李复汉等的意见。力马河组下部为板岩、千枚岩和页岩,向上变为石英砂岩和石英岩,其中偶夹薄层的火山凝灰岩;上部以石英砂岩和石英岩为主,夹薄层的板岩和千枚岩。凤山营组的岩性主要为灰色薄—中厚层条带状灰岩、泥质—砂质白云岩,底部见少量的钙质碎屑岩,局部地区在中下部含菱铁矿层。天宝山组下部以板岩、千枚岩为主,夹火山凝灰岩和炭质板岩;中部以板岩夹变质粉砂岩、砂岩和千枚岩为特点;上部以板岩夹酸性火山岩为主。天宝山组酸性火山岩的地球化学特征表明,它们主要形成于弧陆碰撞的构造环境(Geng Yuansheng et al., 2007a; Zhu Weiguang et al., 2016)。

Yin Fuguang et al. (2011b)在力马河组的中下部发现了火山凝灰岩,并获得 $1082 \pm 13\text{Ma}$ 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄。笔者等在天宝山组酸性火山岩中获得过 $1028 \pm 13\text{Ma}$ 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(Geng Yuansheng et al., 2007a)。此外,天宝山组英安岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $1036 \pm 12\text{Ma}$ (Yin Fuguang et al., 2012a),天宝山组晶屑凝灰岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 $1019 \pm 13\text{Ma}$ (Li Huaikun et al., 2013a), Zhu Weiguang et al. (2016)对会理洪川桥附近出露的天宝山组中酸性火山岩和侵入天宝山组中下部的基性岩脉进行了锆石 SHRIMP U-Pb 定年,分别获得了 $1021 \pm 6.4\text{Ma}$ 、 $1025 \pm 13\text{Ma}$ 和 $1023 \pm 6.7\text{Ma}$ 的年龄。最近笔者在洪川桥、孔明寨等地出露的天宝山组火山凝灰岩和侵入天宝山组的基性岩脉中亦获得了 1.02Ga 左右的年龄结果(详见下文)。以上数据表明天宝山组的火山岩形成于中元古代晚期,由于天宝山组位于会理群上部,而下部的力马河组有 1082Ma 的年龄结果,因此可以判断会理群形成于 $1.1 \sim 1.0\text{Ga}$,属于中元古代晚期。

2.2.3 神农架群

出露于湖北神农架林区及邻区的神农架群是在 1960 年代区域地质调查中建立的中元古代的岩石地层单位,后经专题研究建立了 11 个组的划分方

案,在其上不整合覆盖有新元古代的马槽园群(Li Quan et al., 1987),这一方案在之后的研究中得到了较广泛的应用。2004 年湖北省地质调查院在该区进行 1:25 万区域地质调查时,认为过去的方案忽略了构造重复,因此把神农架群自下而上划分为郑家垭组、大岩坪组、石槽河组、大窝坑组和矿石山组,归属中元古界长城系和蓟县系,同时废除马槽园群(Liu Chengxin et al., 2004)。Qiu Xiaofei et al. (2011)在东部的新华等地原划分的大岩坪组中发现了一些火山岩,从而在神农架群的顶部建立了郑家垭组。Wang Jian et al. (2013)根据详细的沉积相和年代学研究提出,马槽园群形成于 1.15Ga 左右,马槽园群与神农架群也不是角度不整合接触关系,而是楔状沉积接触。这样神农架群和马槽园群的划分又出现了新的问题。经过野外考察和典型剖面的研究,我们认为马槽园群与神农架群之间并不存在角度不整合接触关系,其周围的岩层是神农架群下部的地层(大岩坪组),因此马槽园群(组)只应是神农架群中下部的一个组。以往划分的鹰窝洞组和乱石沟组在岩石组合上具有相似性可以合并为一个组。而后来划分的以火山岩为主的郑家垭组实际火山岩的含量很少,只是原来划分的大岩坪组碎屑岩中的一些夹层,不宜单独划分出一个以火山岩为主的岩组。因此我们建议神农架群自下而上划分为大岩坪组、马槽园组、乱石沟组、大窝坑组、矿石山组、台子组、野马河组、温水河组、石槽河组、送子园组和瓦岗溪组。大岩坪组以泥岩、粉砂岩夹砂岩为主,夹有多套滑塌角砾岩。马槽园组以碳酸盐岩角砾岩为主,局部夹砂岩、火山岩。乱石沟组、大窝坑组和矿石山组以环潮坪碳酸盐岩为主,发育叠层石。台子组以砂岩、粉砂岩为主,夹巨厚含钒粉砂质泥岩。野马河组—温水河组—石槽河组以巨厚浅水潮坪碳酸盐岩为主,发育叠层石,局部夹碎屑岩或中基性火山岩。送子园组以薄层硅质岩为主。瓦缸溪组以浅水叠层石白云岩为主,夹砂岩、粉砂岩等。神农架群总厚度上万余米,根据岩石组合和沉积构造可以判断,主要形成于碳酸盐岩潮坪—缓坡台地与台地边缘礁滩区(Li Quan et al., 1987),在神农架群形成过程中可能伴有多次岩浆活动,部分火山岩的地球化学特征表明它们形成于岛弧环境(Qiu Xiaofei et al., 2011),部分火山岩的地球化学特征则表明它们形成于裂谷盆地(Liu Li et al., 2015)。

Qiu Xiaofei et al. (2011)对郑家垭组安山岩(我们认为应为大岩坪组、且其“安山岩”很可能是侵入

岩)进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定,获得了 $1103 \pm 8\text{Ma}$ 的年龄结果。Li Huaikun et al. (2013b)在神农架群中上部的野马河组凝灰岩中获得了 $1215.8 \pm 2.4\text{Ma}$ 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄;对侵入到神农架群上部石槽河组中的辉长辉绿岩中的锆石和斜锆石分别进行了年龄测定,并获得了 $1083.2 \pm 4.6\text{Ma}$ 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄和 $1115 \pm 9\text{Ma}$ 的斜锆石 SIMS U-Pb 年龄;在该群下部大岩坪组的砂屑硅质白云岩中最年轻一组的碎屑锆石获得了 $1398 \pm 20\text{Ma}$ 的年龄;因此他判断神农架群形成于 $1.4 \sim 1.0\text{Ga}$ 。Wang Jian et al. (2013)在原划分的马槽园群的八里垭组凝灰岩中获得了 $1157 \pm 19\text{Ma}$ 的年龄结果,Qiu Yansheng et al. (2013)在原划分的马槽园群中部变玄武岩中获得了 $1139 \pm 29\text{Ma}$ 的年龄结果(尽管这个数据只有两个数据点,考虑到与其它数据的一致性故予以采用)。Du Qiuding et al (2016)在石槽河组凝灰岩中获得了 $1180 \pm 15\text{Ma}$ 的锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄。对新华北郑家垭组两个砂岩样品中碎屑锆石的年龄测定获得最年轻一组碎屑锆石的年龄为 $980 \sim 995\text{Ma}$ (Xu Daliang et al., 2016)。这些数据表明原来划分的马槽园群形成时代与神农架群基本一致,可以归于神农架群;另一方面也表明,神农架群形成于中元古代的晚期,甚至可以延伸到新元古代早期。

2.2.4 打鼓石群

打鼓石群分布在扬子地块北缘(神农架群以东约 200km)湖北随州一钟祥一带的大洪山地区。打鼓石群未见底,上被新元古代的花山群不整合所覆,构成大洪山背斜的核部(BGMRHB,1990)。打鼓石群自下而上可以划分为太阳寺组、韩家洼组、罗汉岭组、陈家冲组、李家嘴组、垱铺岭组等六个组,厚度大于 1400m 。太阳寺组以灰黄色纹带状泥质板岩为主,夹有含砾砂岩、砂岩、粉砂岩、白云岩透镜体。韩家洼组下部以泥质板岩为主夹泥质白云岩,上部以黄色泥质白云岩为主。罗汉岭组以硅质条纹状白云岩、叠层石白云岩为主,夹多层砾岩、石英砂岩、泥质板岩,局部夹凝灰岩。陈家冲组底部为含砾砂岩,向上以泥质白云岩、白云质灰岩为主,白云岩中含有大量的叠层石。李家嘴组主要由石英细砂岩、砂质板岩、泥质板岩和白云岩组成。垱铺岭组下部以砂岩为主,上部以白云岩和灰岩为主,白云岩中发育韵律层和叠层石(BGMRHB,1990)。近年来根据板块构造特征,一些研究者对大洪山地区的前寒武纪地层进行了重新划分,作为被动陆缘只保留了洪山寺附

近出露的打鼓石群(仅包括罗汉岭组和陈家冲组),而以往在罗汉岭一带划分的打鼓石群都划归到新元古代的增生杂岩中(Hu Zhengxiang et al., 2015)。由于在罗汉岭一带的罗汉岭组凝灰岩中获得了 1225Ma 和 1239Ma 的年龄结果(Li Huaikun et al., 2016),应属于中元古代,与新元古代的增生杂岩无关。因此本文仍采用以往对打鼓石群的划分意见(BGMRHB,1990)。打鼓石群下部为近岸水下冲积扇沉积,中、上部为滨浅海碳酸盐岩及碎屑泥质沉积(Xiong Xingwu et al., 1991)。

以往的研究由于缺少精确的同位素年龄数据,多根据岩石组合、微古植物特征的区域对比确定其时代。有的研究者认为打鼓石群大致可与神农架群的上亚群(台子组、野马河组、温水河组、石槽河组、送子园组和瓦岗溪组)进行对比,大致相当于以往定义的蓟县系($1.4 \sim 1.0\text{Ga}$)(Zhao Yinsheng et al., 1987;BGMRHB,1990);有的研究者则认为打鼓石群与整个神农架群可以对比,时代上大致相当于长城系一蓟县系,并认为它们同是扬子地台北缘中元古代边缘裂陷槽沉积的产物(Xiong Xingwu et al., 1991)。最近,在湖北随州大洪山地区的罗汉岭一带的罗汉岭组中部的凝灰岩获得了 $1225 \pm 19\text{Ma}$ 和 $1239 \pm 23\text{Ma}$ 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄结果(Li Huaikun et al., 2016)。表明打鼓石群形成时代与神农架群相似,都属于中元古代晚期。此外,不整合于打鼓石群之上的花山群(或花山混杂岩)中的辉长岩曾获得过 $974 \pm 14\text{Ma}$ 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄结果(Shi Yuruo et al., 2007),也可证明打鼓石群形成时代应大于 1.0Ga 。根据这些有限的资料可以判断打鼓石群形成于中元古代晚期。

3 新的年代学资料

本次研究对通安组 1~2 段的凝灰岩(DC14-1)、河口群变石英角斑岩(100619-4)和会理群天宝山组凝灰岩(100615-3)及侵入会理群的基性岩脉(100617-2)进行了锆石原位定年测试,其中通安组的样品在中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成,其实验测试方法和实验条件见 Li Huaikun et al. (2010),河口群样品在中国地质大学(北京)地质实验中心元素地球化学实验室完成,其测试方法和实验条件等见 Geng Yuansheng et al. (2012),会理群样品在北京离子探针中心完成,其测试方法及实验条件见 Song Biao et al., 2002; Liu Dunyi et al., 2003。

3.1 通安组的年龄结果

通安组凝灰岩样品(DC14-1)采自会理县芭蕉乡大麦地村南,地理坐标:N;26°21′21.42″,E: 102°25′25.31″。该点出露的主要是通安组二段(或一段)的青灰色板岩,其中夹有多层灰白色的凝灰岩。凝灰岩单层厚 10cm 左右,在该点上见有四层。凝灰岩细粒变晶结构,主要由石英、斜长石、黑云母和绿泥石组成。

该样品中的锆石多不规则状,有的为次浑圆状,粒度一般在 80~100μm 间。在阴极发光下,大部分锆石发光不强,呈灰色,内部结构不明显。少部分锆石颗粒发光较强,呈亮白色。对该样品的 24 粒锆石进行了 24 个点的分析(表 1)。其中发光较亮的锆石分析点 Pb 含量较低($10\times 10^{-6}\sim 28\times 10^{-6}$),

其²⁰⁶Pb/²³⁸U 比值也较低(0.0210~0.1388),²⁰⁶Pb/²³⁸U 的年龄从 134±1Ma 到 830±5Ma。从一些锆石具有较明显的亮边结构看,这些锆石显然受到了后期热液的改造。由于改造程度不同同位素体系均一化程度不同,导致²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄的差异,因此它们可能不具有确切的地质意义。位于无亮边锆石核部的 15 个分析点在谐和图上多有铅丢失,它们构成一条较好的不一致线,不一致线与谐和线的上交点年龄为 1744±14Ma(图 3)。其中靠近谐和线的 5 个分析点的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄为 1723±5.8Ma,这两个年龄在误差范围内一致,应大体代表该凝灰岩的形成时代。这一结果与通安组一段角闪岩 1720±7Ma 的年龄结果(Ren Guangming et al., 2014)一致。

表 1 扬子地块西缘通安组凝灰岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果
Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb analyses of the tuff samples from the Tong'an Formation in southwestern margin of Yangtze Block

DC14.1 测点号	Pb		U		同位素原子比率						表面年龄(Ma)					
	(×10 ⁻⁶)		²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	
1	78	238	0.5986	0.2922	0.0019	4.2986	0.0267	0.1067	0.0004	1652	11	1693	11	1744	8	
2	113	367	0.6979	0.2741	0.0025	4.0165	0.0311	0.1063	0.0004	1561	14	1638	13	1737	6	
3	38	885	0.6524	0.0374	0.0002	0.3395	0.0021	0.0659	0.0004	237	1	297	2	803	13	
4	23	559	0.2129	0.0416	0.0002	0.2990	0.0021	0.0521	0.0004	263	1	266	2	291	16	
5	75	230	0.6113	0.2923	0.0017	4.2823	0.0192	0.1063	0.0004	1653	10	1690	8	1736	7	
6	85	485	0.9747	0.1389	0.0008	1.3904	0.0065	0.0726	0.0003	838	5	885	4	1003	8	
7	59	278	1.0429	0.1878	0.0019	2.5306	0.0306	0.0977	0.0005	1109	11	1281	15	1581	10	
8	157	535	0.9231	0.2564	0.0018	3.7269	0.0226	0.1054	0.0004	1471	10	1577	10	1722	6	
9	88	267	0.4637	0.3039	0.0017	4.4258	0.0196	0.1056	0.0004	1711	10	1717	8	1725	6	
10	119	400	0.6555	0.2649	0.0018	3.8638	0.0214	0.1058	0.0004	1515	10	1606	9	1728	6	
11	87	271	0.8092	0.2801	0.0018	4.1210	0.0255	0.1067	0.0004	1592	10	1658	10	1744	7	
12	64	192	0.5231	0.3039	0.0017	4.4155	0.0186	0.1054	0.0004	1711	10	1715	7	1721	7	
13	79	173	0.3127	0.4195	0.0025	9.3785	0.0440	0.1621	0.0006	2258	13	2376	11	2478	6	
14	48	143	0.5563	0.3037	0.0019	4.4226	0.0224	0.1056	0.0004	1710	11	1717	9	1725	7	
15	105	303	0.7051	0.3035	0.0017	4.4216	0.0187	0.1056	0.0004	1709	10	1716	7	1726	6	
16	9	380	0.6061	0.0210	0.0001	0.1462	0.0038	0.0504	0.0013	134	1	139	4	214	60	
17	71	211	0.5637	0.3043	0.0018	4.4166	0.0197	0.1053	0.0004	1713	10	1715	8	1719	7	
18	65	239	0.5593	0.2457	0.0014	3.5121	0.0162	0.1037	0.0004	1416	8	1530	7	1691	7	
19	94	570	1.3138	0.1228	0.0008	1.0985	0.0067	0.0649	0.0003	746	5	753	5	771	9	
20	54	171	0.5576	0.2847	0.0016	4.1970	0.0192	0.1069	0.0004	1615	9	1673	8	1748	7	
21	78	566	0.2622	0.1374	0.0008	1.2679	0.0054	0.0669	0.0002	830	5	831	4	836	8	
22	10	403	0.8184	0.0219	0.0001	0.1520	0.0036	0.0504	0.0012	140	1	144	3	213	54	
23	24	277	0.3403	0.0833	0.0005	0.6745	0.0052	0.0588	0.0004	516	3	523	4	558	16	
24	20	133	0.4001	0.1388	0.0008	1.7597	0.0141	0.0919	0.0008	838	5	1031	8	1466	16	

备注:2, 9, 12, 14, 15, 17 号点²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表面年龄加权平均值 1723±6Ma。

3.2 河口群变石英角斑岩年龄结果

变石英角斑岩(100619-4)采自拉拉矿区采坑的北西部,地理坐标为北纬 26°14′06″,东经 101°56′50″。该点由下至上依次出露有河口群落幽组的浅粉色石英角斑岩、含矿石英角斑岩、含砾石英斑岩、

含矿的石英角斑岩、辉绿岩脉、浅粉色石英斑岩、含矿的石英岩和长石石英砂岩、灰黑色板岩和浅色条带状石英板岩,各岩石之间基本为平行整合关系。样品采自含矿的石英角斑岩,岩石呈浅粉色,野外见其中有暗色的团块。岩石主要由石英、长石、黑云

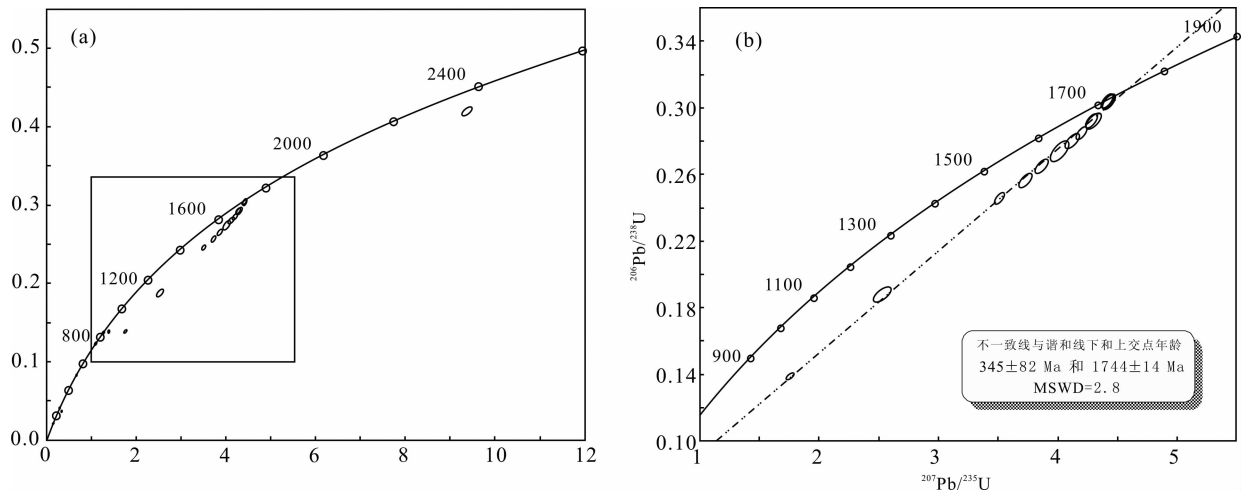


图 3 扬子地块西缘通安组凝灰岩(DC14-1)锆石 U-Pb 同位素谐和图
Fig. 3 Zircon LA-ICP-MS U-Pb Concordia diagrams of tuff (DC14-1) from Tong'an formation, southwestern margin of Yangtze Block

(a)—所有分析点;(b)—为 a 图方框部分的放大
(a)—all analyzed spots; (b)—the local enlargement of fig. a

母、白云母等组成,呈块状,弱片麻状构造,不等粒镶嵌结构。

在阴极发光下大部分锆石具有不同程度的环带结构,部分不具环带结构。值得注意的是,具有环带的锆石颗粒 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄多在 1.65Ga 左右,而没有环带的锆石颗粒的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄仅为 1.34Ga 左右。结合锆石特点,我们认为具有环带结构的锆石是岩浆结晶期的产物,而不具环带的锆石是受到后期变质改造的结果。对该样品进行了 14 个点的 LA-ICP-MS U-Pb 测试(表 2),其中 10 个具有环带结构的分析点构成该样品锆石的主群,基本分布在谐和线上(图 4), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $1659\pm 23\text{Ma}$ 。其 Th/U 比值在 0.63 到 1.85 之间,高的 Th/U 比值表明它们是岩浆成因的。因此 1659Ma 应代表石英角斑岩的形成时代。该结果与 Chen W T et al. (2013)在落垭组凝灰岩中获得的 $1679\pm 23\text{Ma}$ 的结果基本一致。此外该样品中还有两个分析点(12.1 和 14.1,见表 2)的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 $2103\pm 34\text{Ma}$ 和 $2592\pm 56\text{Ma}$,年龄明显大于主群的年龄,应为继承锆石。另外,该样品还有两个分析点(6.1 和 11.1,见表 2),其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 $1391\pm 68\text{Ma}$ 和 $1342\pm 40\text{Ma}$,明显低于该样品主群的年龄。由于这两个锆石的 Th/U 比值相对较低(分别为 0.21 和 0.34),锆石无环带,且有狭窄的增生边,因此它们有可能是受到后期热事件改造的产物,不能代表岩石的形成时间。

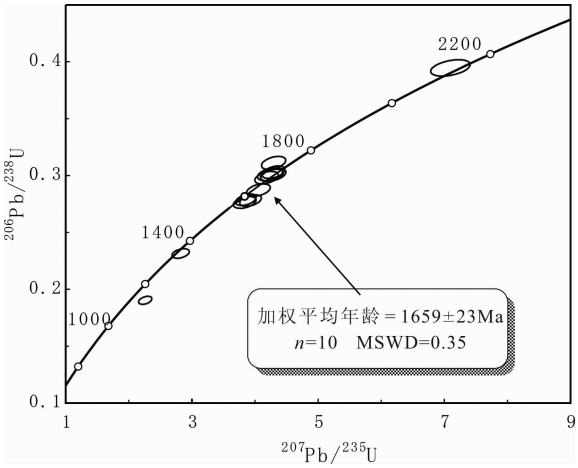


图 4 扬子地块西南缘拉拉铜矿区河口群石英角斑岩 (100619-4)的锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 Zircon LA-ICP-MS U-Pb Concordia diagram of quartz-keratophyre (100619-4) from Hekou group in Lala ore district, southwestern margin of Yangtze Block

3.3 会理群天宝山组的年龄

本次研究分别对会理孔明寨会理群天宝山组的凝灰岩和洪川桥侵入到会理群天宝山组的基性岩脉进行了锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定。

100515-3 号样品产自孔明寨附近天宝山组下部的凝灰岩,地理标为北纬 $26^{\circ}56'46''$,东经 $102^{\circ}17'15''$ 。该样品呈纹层状,由细粒的凝灰岩层和较粗的粉砂岩互层组成。在凝灰岩层和粉砂岩层中都见有棱角状的石英晶屑,样品主要采自凝灰岩层。该样品中的锆石多为短柱状,柱面较发育,但锥面不发

表 2 扬子地块西南缘拉拉铜矿区石英角斑岩(100619-4)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

点号	Pb ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	Th/U	同位素比值						视年龄 (Ma)					
					$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
						1 σ		1 σ		1 σ		1 σ		1 σ		1 σ
1.1	163.718	453.23	287.87	0.64	0.27874	0.00335	3.85561	0.10757	0.1003	0.00282	1585	17	1604	22	1630	34
2.1	37.4075	99.47	68.03	0.68	0.28728	0.00358	4.05569	0.12455	0.10237	0.00318	1628	18	1645	25	1668	38
3.1	392.113	954.22	919.87	0.96	0.30016	0.00359	4.27017	0.11854	0.10316	0.00289	1692	18	1688	23	1682	34
4.1	218.821	552.26	397.72	0.72	0.30299	0.00364	4.29357	0.12038	0.10275	0.00291	1706	18	1692	23	1674	34
5.1	139.693	315.03	584.01	1.85	0.27805	0.00338	3.92868	0.11347	0.10245	0.00299	1582	17	1620	23	1669	35
6.1	138.962	505.89	105.49	0.21	0.23149	0.00279	2.82142	0.09085	0.08839	0.00304	1342	15	1361	24	1391	68
7.1	44.846	125.19	79.16	0.63	0.27638	0.00345	3.83688	0.11956	0.10066	0.00317	1573	17	1601	25	1636	39
8.1	44.070	111.54	80.01	0.72	0.30079	0.00376	4.28816	0.13389	0.10337	0.00326	1695	19	1691	26	1685	39
9.1	54.757	130.73	130.12	1.00	0.3011	0.00374	4.23877	0.1307	0.10208	0.00318	1697	19	1682	25	1662	39
10.1	101.586	248.56	240.28	0.97	0.29818	0.00364	4.18347	0.12337	0.10173	0.00303	1682	18	1671	24	1342	40
11.1	79.056	336.54	115.42	0.34	0.19032	0.00234	2.26118	0.06958	0.08615	0.00268	1123	13	1200	22	1342	40
12.1	320.377	646.88	285.50	0.44	0.39462	0.00477	7.09681	0.20728	0.1304	0.00385	2144	22	2124	26	2103	34
13.1	191.342	474.94	334.57	0.70	0.31113	0.00378	4.29532	0.12715	0.1001	0.003	1746	19	1692	24	1626	37
14.1	110.629	244.72	49.20	0.20	0.35577	0.00436	8.51423	0.25912	0.17357	0.00569	1962	21	2287	28	2592	56

育,有的则呈板状。在阴极发光下,多数颗粒具有振荡的生长环带,显示岩浆成因的特点。有的颗粒内部结构不清楚,但其年龄与其他锆石基本一致。

对该样品的 19 粒锆石进行了 19 个点的 SHRIMP U-Pb 同位素分析(表 3)。其 U 含量 $65\times 10^{-6}\sim 249\times 10^{-6}$, Th 含量 $27\times 10^{-6}\sim 2223\times 10^{-6}$, Th/U 比值从 0.42 到 0.92,显示岩浆成因的特点。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上,除 2 个点(5 和 19 号点)比较偏离谐和线之外,其余 17 个点基本位于谐和线上(图 5),它们 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为 $1018\pm 11\text{Ma}$, MSWD=2.3。该年龄值与以往在天宝山组获得的年龄值(Geng Yuansheng et al., 2007a; Yin Fuguang et al., 2012a; Zhu Weiguang et al., 2016)在误差范围内一致,可以代表天宝山组下部火山凝灰岩的形成时代。

100617-2 号样品采自洪川桥南,地理坐标为北纬 $26^{\circ}30'57''$,东经 $102^{\circ}08'36''$,岩性为沿天宝山组与凤山营组之间顺层侵入的基性岩脉。该样品主要由细粒的斜长石、单斜辉石、角闪石等组成,但很多辉石和角闪石已绿泥石化,但局部仍保留有辉石。可以见到变余辉绿结构,较大的长石为骨架,已退变为绿泥石的暗色矿物充填其中。

该样品中大部分锆石为柱状,长宽比 2 : 1 到 3 : 1。在阴极发光下,部分锆石显示出带状环带(图 6a, b, c, e),有的锆石则几乎不发育内部结构,具有偏基性岩锆石的特点(Jian Ping et al., 2003, 2004)。有的锆石外围发育了非常窄的断续的亮边

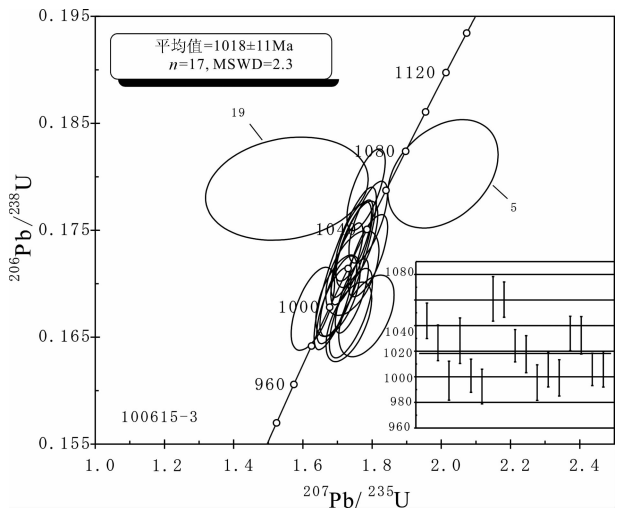


图 5 扬子地块西南缘天宝山组凝灰岩(100615-3) 锆石年龄谐和图

Fig. 5 Zircon SHRIMP U-Pb Concordia diagram of tuff (100615-3) from the Tianbaoshan Formation of Huili Group, southwestern margin of Yangtze Block

(图 6a, b, f),表明它们经历了后期的改造。对该样品进行了 15 个点的锆石 SHRIMP U-Pb 同位素分析(表 3)。它们的 U 含量在 80×10^{-6} 到 695×10^{-6} 之间, Th 含量 52×10^{-6} 到 997×10^{-6} , Th/U 比值较高(0.67~1.48),具有岩浆锆石 Th/U 比值的特点。所分析的 15 个点谐和度较高,所以多数点都位于谐和线上。去掉谐和度较低的 15.1 点和稍偏离主群的 8.1 号点之外,其余 13 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为 $1026\pm 7\text{Ma}$, MSWD=0.11

表 3 扬子地块西南缘会理天宝山组凝灰岩 (100615-3) 和侵入天宝山组基性岩脉 (100617-2) 锆石 SHRIMP U-Pb 分析结果

Table 3 Zircon SHRIMP U-Pb analyses of the tuff (100613-3) from the Tianbaoshan Formation and mafic dyke (100617-2) intruded Huili Group, in Hongchuanqiao village, Huili county, southwestern margin of Yangtze Block

点 号	Pb(× 10 ⁻⁶)	U(× 10 ⁻⁶)	Th(× 10 ⁻⁶)	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb	同位素比值						视年龄(Ma)						不谐 和度
						²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±%	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±%	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	
100615-3																		
1.1	—	157	104	0.68	23.7	0.1758	1.4	1.789	2.1	0.0738	1.5	1.044	±14	1.049	±22	1.036	±30	—1
2.1	0.00	140	68	0.51	20.7	0.1726	1.5	1.788	2.1	0.0751	1.5	1.027	±14	1.054	±24	1.071	±30	4
3.1	—	108	55	0.53	15.5	0.1673	1.6	1.739	2.4	0.0754	1.7	997	±15	994	±26	1.079	±34	8
4.1	0.09	206	145	0.73	30.7	0.1729	1.9	1.742	2.3	0.07306	1.4	1.028	±18	1.013	±23	1.016	±27	—1
5.1	—	65	27	0.42	10.00	0.1803	1.9	2.00	5.3	0.0807	4.9	1.068	±18	1.226	±91	1.213	±97	12
6.1	—	191	107	0.58	27.5	0.1680	1.4	1.690	1.9	0.07296	1.3	1.001	±13	1.001	±21	1.013	±27	1
7.1	0.29	147	74	0.52	21.1	0.1664	1.5	1.733	2.5	0.0755	2.0	992	±14	975	±28	1.082	±41	8
8.1	1.80	79	36	0.47	12.3	0.1789	1.8	1.55	10.0	0.0630	9.8	1.061	±17	843	±94	708	±210	—50
9.1	0.07	189	127	0.70	29.0	0.1788	1.4	1.783	2.0	0.0723	1.5	1.060	±14	1.045	±22	995	±30	—7
10.1	0.09	249	223	0.92	36.9	0.1722	1.3	1.727	1.8	0.07275	1.2	1.024	±13	981	±20	1.007	±24	—2
11.1	0.00	125	59	0.49	18.3	0.1710	1.5	1.743	2.9	0.0739	2.5	1.018	±14	982	±25	1.039	±50	2
12.1	—	133	72	0.56	19.0	0.1670	1.5	1.784	3.0	0.0775	2.5	995	±14	1.015	±34	1.133	±51	12
13.1	—	191	109	0.59	27.6	0.1688	1.5	1.702	2.1	0.0731	1.4	1.006	±14	976	±21	1.018	±29	1
14.1	0.25	125	62	0.51	18.1	0.1677	1.5	1.629	2.5	0.0705	2.0	999	±14	968	±32	942	±42	—6
15.1	0.16	184	125	0.71	27.5	0.1740	1.4	1.745	2.0	0.0728	1.4	1.034	±13	1.010	±20	1.008	±29	—3
16.1	0.00	123	68	0.57	18.4	0.1737	1.5	1.756	2.3	0.0733	1.7	1.032	±15	1.040	±25	1.023	±34	—1
17.1	—	235	166	0.73	34.1	0.1689	1.4	1.742	1.8	0.07480	1.2	1.006	±13	991	±18	1.063	±24	5
18.1	0.16	141	71	0.52	20.5	0.1689	1.5	1.702	2.5	0.0731	2.0	1.006	±14	954	±27	1.016	±40	1
19.1	—	227	153	0.69	33.5	0.1714	2.9	1.722	3.4	0.0729	1.8	1.020	±28	996	±34	1.010	±37	—1
100617-2																		
1.1	0.00	695	997	1.48	103	0.1722	1.3	1.725	1.4	0.07266	0.63	1.024	±12	983	±13	1.004	±13	—2
2.1	—	247	246	1.03	36.4	0.1715	1.5	1.773	1.7	0.07498	0.95	1.020	±14	1.017	±17	1.068	±19	4
3.1	0.12	128	113	0.91	18.9	0.1716	1.7	1.731	2.3	0.0732	1.5	1.021	±16	1.008	±22	1.019	±30	0
4.1	—	367	426	1.20	54.7	0.1735	1.2	1.765	1.5	0.07378	0.81	1.031	±12	1.002	±14	1.036	±16	0
5.1	0.04	155	147	0.98	23.1	0.1737	1.6	1.773	2.1	0.07405	1.3	1.032	±15	1.001	±20	1.043	±27	1
6.1	—	181	174	1.00	26.9	0.1735	1.3	1.839	2.5	0.0769	2.2	1.031	±13	1.052	±21	1.118	±43	8
7.1	0.10	124	122	1.02	18.4	0.1723	1.5	1.705	2.0	0.0718	1.4	1.025	±14	972	±18	980	±29	—5
8.1	—	213	216	1.05	32.5	0.1785	1.3	1.828	2.1	0.0743	1.6	1.059	±13	1.058	±18	1.049	±33	—1
8.1	0.07	340	275	0.84	50.1	0.1716	1.2	1.729	1.5	0.07308	0.95	1.021	±12	997	±15	1.016	±19	0
10.1	—	434	568	1.35	64.4	0.1727	1.2	1.753	1.5	0.07362	0.92	1.027	±11	977	±13	1.031	±19	0
11.1	0.03	461	610	1.37	68.0	0.1718	1.2	1.732	1.5	0.07313	0.87	1.022	±12	984	±14	1.018	±18	0
12.1	—	135	116	0.89	19.8	0.1716	1.8	1.794	2.6	0.0758	1.9	1.021	±17	1.025	±25	1.091	±38	6
13.1	0.10	468	519	1.15	69.5	0.1729	1.2	1.727	1.5	0.07243	0.94	1.028	±11	983	±17	998	±19	—3
14.1	—	312	340	1.13	46.3	0.1728	1.2	1.770	1.5	0.07431	0.88	1.027	±12	987	±14	1.050	±18	2
15.1	0.60	80	52	0.67	11.7	0.1698	1.6	1.607	4.0	0.0686	3.6	1.011	±15	907	±35	888	±75	—14

(图 7)。这个年龄与 Zhu Weiguang et al. (2016) 获得的侵入天宝山组基性岩脉的 1023±6.7Ma 的年龄结果在误差范围内一致,可以代表该基性岩脉的形成时代。

4 地层的区域对比

扬子地块西缘紧邻三江造山带,扬子北缘紧邻南秦岭造山带,受晚期造山作用的影响和破坏,区内的中元古代地层出露零星,多被大型断裂所分割。因此不同地区的中元古代地层的相互关系只能通过对比加以解决。由于过去条件所限,缺少高精度的测年数据,加上中元古代地层多为无化石地层(或化

石不具准确的年代学含义),只能进行岩性岩相对比,因而认识的局限性导致地层对比的长期争论。近 30 年来锆石原位定年技术的快速发展提供了大量精确的同位素年代学数据,也为地层的年代对比提供了可靠的基础。

从图 8 可以看出不论是云南的大红山群、东川群还是四川的河口群和通安组(1~4 段)下部都有大于 1.7Ga 的火山岩(包括火山凝灰岩),尽管其顶部目前还缺少可靠的同位素年龄限定,但是东川地区黑山头组有 1.5Ga 的凝灰岩(Sun Zhiming et al., 2009; Li Huaikun et al., 2013a),通安组被 1.5Ga 的基性岩墙所侵入(Geng Yuansheng et al.,

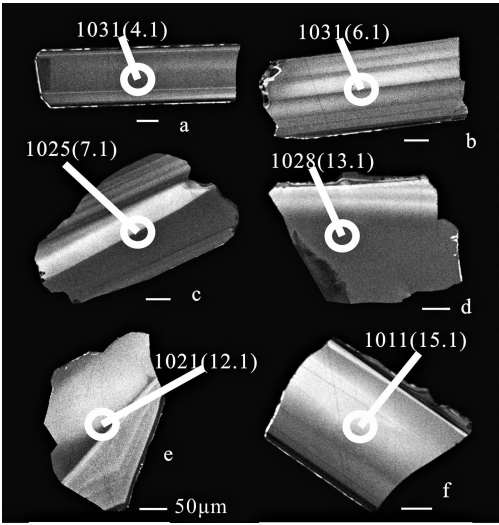


图 6 扬子西南缘洪川桥天宝山组基性脉中
锆石阴极发光图像

Fig. 6 CL images of zircons for mafic dyke intruded to Tianbaoshan Formation, Hongchuanqiao, Huili county, southwestern margin of Yangtze Block

2012; Fan Hongpeng et al., 2013), 所以大致可以把这些岩群的形成时代限定在 1.75~1.45Ga。出露于不同地区的这些地层是否形成于同一个盆地目前难以判断, 但是这些地层的岩石组合及其中的火山岩的地球化学特征都表明, 这些岩群形成于拉张环境 (Zhao Xinfu et al., 2010; Zhu Zhimin et al., 2013; Chen W T et al., 2013; Zhou Jiayun et al., 2011; Wang Shengwei et al., 2013, 2016; Wang Zizheng et al., 2013; Guo Yang et al., 2014), 它们是在相同构造背景下形成的。同时这些岩层都受到 1.7Ga 左右和 1.5Ga 左右岩浆热事件的影响, 突出的表现是很多地区都多有这两期岩脉的侵入。另外, 这些地层中都含有与岩浆热液有关的铁氧化物铜金矿床 (Iron-Oxide-Copper-Gold, IOCG) 或层状铜矿床 (Sediment-hosted Stratiform Copper, SSC) (Zhao Xinfu et al., 2011; Wang Shengwei et al., 2016)。根据这些特点, 我们认为云南的大红山群、东川群以及四川的河口群和通安组 (1~4 段) 在区域上是可以对比的, 都形成于 1.75~1.45Ga 的拉张环境。中元古代早期地层在扬子地块北缘也可能有一定的分布, 如米仓山地区分布的火地垭群。火地垭群或划分为下部的上两组和上部的麻窝子组 (He Zhengwei et al., 1997a, b), 或划分为上两组、麻窝子组和铁船山组 (Ling Wenli et al., 1996)。上两组和麻窝子组主要由变质砾岩、石英岩、碳酸盐岩、硅质岩、板岩类和片岩类组成, 铁船山组主要由

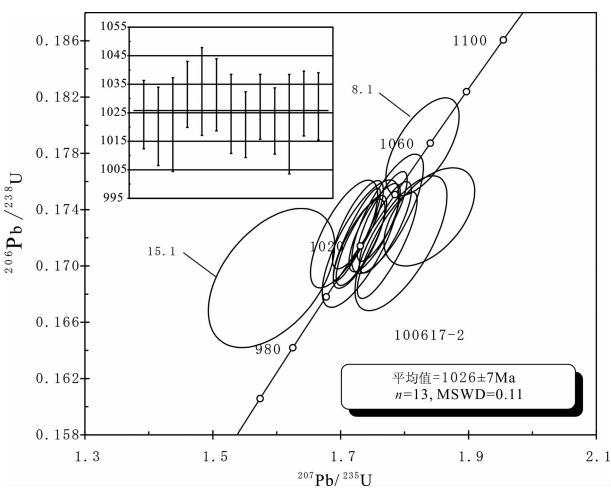


图 7 扬子地块西南缘侵入天宝山组基性岩脉
(100617-2) 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 7 Zircon SHRIMP U-Pb Concordia diagram of mafic dyke (100617-2) intruded to Tianbaoshan formation, Hongchuanqiao, Huili county, southwestern margin of Yangtze Block

变质火山岩系组成。用颗粒锆石蒸发法在上两组钠长黑云片岩 (原岩为中酸性火山岩) 中获得过 $1619 \pm 28\text{Ma}$ 的年龄 (He Zhengwei et al., 1997b), 铁船山组变玄武岩、变流纹安山岩等的全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 $1668 \pm 65\text{Ma}$ (Ling Wenli et al., 1996), 这些数据表明火地垭群形成于中元古代早期。由于缺少精度较高的锆石原位定年数据, 只能大致判断火地垭群可能属于中元古代早期的地层。

从图 8 可以看出, 云南中部的昆阳群、四川南部的会理群、扬子北缘神农架地区的神农架群和湖北大洪山地区的打鼓石群形成年龄都在 1.3~1.0Ga, 尽管这几个群的底部尚缺少确切的年龄限制, 但是神农架群底部大岩坪组碎屑锆石中最年轻一组的年龄为 1.39Ga, 可以大致限定神农架群的底界稍晚于 1.4Ga, 考虑到神农架群中部野马河组凝灰岩为 1216Ma (Li Huaikun et al., 2013b), 其距离底界还有数千米的沉积岩系, 其底界应非常接近 1.4Ga。所以我们认为神农架群的形成时代为 1.4~1.0Ga。打鼓石群和神农架群基本可以对比, 因此其形成时代亦为 1.4~1.0Ga。昆阳群和会理群底部也缺少可靠的年龄限定, 昆阳群获得 1.1~1.0Ga 的火山岩位于昆阳群的中下部, 下部仅有黄草岭组, 其沉积时限不可能很长。而会理群下部力马河组凝灰岩的年龄仅为 1082Ma (Yin Fuguang et al., 2011b), 其下部的沉积岩系的沉积时限也不可能很长, 因此我们初步判断昆阳群和会理群的底界应在 1.2Ga 左

右。这几个岩群上部或顶部多有 $1.0 \sim 1.05\text{Ga}$ 的火山岩,表明它们顶界应在 1.0Ga 左右。但是有的 1.0Ga 左右的火山岩发育在岩群上部(如昆阳群),其上还有较厚的沉积层,因此其顶界可能到新元古代早期。在神农架群的碎屑岩中最年轻的碎屑锆石年龄为 $980 \sim 995\text{Ma}$ (Xu Daliang et al., 2016),也可以说明其顶界的时限可能已经延伸到新元古代早期。以上分析表明,昆阳群和会理群的形成时代在 1.2Ga 到 1.0Ga 之间,神农架群和打鼓石群的形成时代在 1.4Ga 到 1.0Ga 之间,它们的顶界都可能延伸到新元古代早期。值得注意的是,这些岩群中上部的白云岩中发育有大量的叠层石,表明其形成时藻类发育,形成环境相似。

除图 8 中所表示出的昆阳群、会理群、神农架群、打鼓石群和通安组五段之外,在扬子地块西南缘云南的元谋地区出露的直林群以及在四川小相岭地区出露的登相营群等也属于新元古代晚期地层。在元谋地区直林群的变质玄武岩中获得过 $1043 \pm 19\text{Ma}$ 和 $1050 \pm 14\text{Ma}$ 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄(Chen W T et al. 2014),侵入到直林群的片麻状花岗岩的年龄为 $1069 \pm 7\text{Ma}$ (Fu Yu et al., 2015),这些年龄与昆阳群、会理群以及通安组(五段)的年龄非常接近,表明直林群也应属于中元古代晚期地层。但是由于元谋地区新元古代岩浆发育,直林群地层在新元古代花岗岩中零星分布,难以建立完整的地层层序,所以本文没有单独对其进行描述。在四川小相岭地区出露的登相营群,其组成与会理群较相似,有较厚的碳酸盐沉积,在白云岩中叠层石较发育。也有中酸性的火山岩层。笔者等曾在登相营群火山岩层中获得了 $1030 \pm 19\text{Ma}$ 的年龄结果(Geng Yuansheng et al., 2008)。目前只有一个较精确的年龄数据,还缺少更多年龄数据的支持,所以本文也没有单独进行讨论。

5 结论

根据新的年代学资料和已有资料的综合分析,本文得出以下结论:

(1) 新的锆石原位定年数据表明,通安组下部的凝灰岩时代为 $1744 \pm 14\text{Ma}$,河口群落函组石英角斑岩的形成时代为 $1659 \pm 14\text{Ma}$,会理群天宝山组中凝灰岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $1018 \pm 11\text{Ma}$,侵入到会理群中的基性岩脉的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $1026 \pm 7\text{Ma}$,为该区分中元古代地层划分对比提供了新的年代学证据。

(2) 中元古代早期的地层包括扬子西南缘分布的大红山群、东川群、河口群和通安组(1~4 段),它们都赋存有大量的与岩浆热液有关的铁氧化物铜金(IOCg)矿床或层状铜矿床(SSC),都是在 $1.75 \sim 1.45\text{Ga}$ 期间形成于大陆拉张环境的沉积组合。扬子北缘的火地垭群可能也属于中元古代早期。

(3) 中元古代晚期的地层包括扬子西南缘分布的昆阳群、会理群和扬子北缘分布的神农架群和打鼓石群等,它们都含有丰富的叠层石,意味着它们形成于潮湿温暖的浅海环境。目前的年代学资料表明,昆阳群和会理群主要形成于 $1.2 \sim 1.0\text{Ga}$,神农架群和打鼓石群主要形成于 $1.4 \sim 1.0\text{Ga}$,但是它们的顶界可能已延伸到新元古代早期。在云南元谋出露的直林群、在川西出露的登相营群等地层也属于中元古代晚期地层。

致谢:在本项研究中始终得到沈其韩院士、王泽九研究员的帮助,进行过有益的讨论。审稿人和责任编辑提出了修改建议,在此一并致谢。

References

- Bai Daoyuan, Jia Baohua, Liu Wei, Chen Bihe, Liu Yaorong, Zhang Xiaoyang. 2010. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the igneous rocks from Chengbu, Hunan: Constraint on the Neoproterozoic tectonic evolution of the Jiangnan Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 84(12): 1715~1726 (in Chinese with English abstract).
- BGMRGX (Bureau of Geology Mineral Resources of Guangxi Province). 1985. *Regional Geology of Guangxi Autonomous Region*. Beijing: Geological Publishing House, 1~853pp (in Chinese with English summary).
- BGMRHB (Bureau of Geology and Mineral Resources Hubei Province). 1990. *Regional Geology of Hubei Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1~705 (in Chinese with English summary).
- BGMRHN (Bureau of Geology Mineral Resources of Hunan Province). 1988. *Regional Geology of Hunan Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1~718 (in Chinese with English summary).
- BGMRJX (Bureau of Geology Mineral Resources of Jiangxi Province). 1984. *Regional Geology of Jiangxi Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1~921 (in Chinese with English summary).
- BGMRSC (Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province). 1991. *Regional Geology of Sichuan Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1~730 (in Chinese with English summary).
- BGMRZJ (Bureau of Geology Mineral Resources of Zhejiang Province). 1989. *Regional geology of Zhejiang Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1~688 (in Chinese with English summary).

- English summary).
- Chang Xiangyang, Zhu Bingquan, Sun Dazhong, Qiu Ninghua, Zou Ri. 1997. Isotope geochemistry study of Dongchuan copper deposits in middle Yunnan province, SW China; I. stratigraphic chronology and application of geochemical exploration by lead isotopes. *Geochemica*, 26(2): 32~38 (in Chinese with English abstract).
- Chen Genwen, Xia Bin. 2001. Study on the genesis of the Lala copper deposit, Sichuan Province. *Bulletin of mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(1): 42~44 (in Chinese with English abstract).
- Chen Kang, Gao Shan, Wu Yuanbao, Guo Jingliang, Hu Zhaochu, Liu Yongsheng, Zong Keqing, Liang Zhengwei, Geng Xianlei. 2013. 2.6~2.7 Ga crustal growth in Yangtze craton, South China. *Precambrian Research*, 224: 472~490.
- Chen W T, Zhou Meifu, Zhao Xinfu. 2013. Late Paleoproterozoic sedimentary and mafic rocks in the Hekou area, SW China; Implication for the reconstruction of the Yangtze Block in Columbia. *Precambrian Research*, 231: 61~77.
- Chen W T, Sun Weihua, Wang Wei, Zhou Junhong, Zhou Meifu. 2014. "Grenvillian" intra-plate mafic magmatism in the southwestern Yangtze Block, SW China. *Precambrian Research*, 242: 138~153.
- Chen Zhihong, Xing Guangfu, Guo Kunyi, Dong Yongguan, Chen Rong, Zeng Yong, Li Linglong, He Zhenyu, Zhao Ling. 2009. Petrogenesis of the Pingshui keratophyre from Zhejiang: zircon U-Pb age and Hf isotope constraints. *Chinese Science Bulletin*, 54(5): 610~617 (in Chinese without English abstract).
- Cheng Yuqi. 1994. *An Introduction to Regional Geology of China*. Beijing: Geological Publishing House, 1~517 (in Chinese without English abstract).
- Dai Henggui. 1997. On the strata, structure and prospecting target area of Kunyang Group and Huili Group in Kangdian region. *Yunnan Geology*, 16(1): 1~39 (in Chinese with English abstract).
- Deng Qi, Wang Jian, Wang Zhengjiang, Wang Xuance Qiu Yansheng, Yang Qingxiong, Du Qiuding, Cui Xiaozhuang, Zhou Xiaolin. 2013. Continental flood basalts of the Huashan Group, northern margin of the Yangtze block -implications for the breakup of Rodinia. *International Geology Review*, 55(15): 1865~1884.
- Du Qiuding, Wang Zhengjiang, Wang Jian, Deng Qi, Yang Fei. 2016. Geochronology and geochemistry of tuff beds from the Shicaohe Formation of Shennongjia Group and tectonic evolution in the northern Yangtze Block, South China. *International Journal of Earth Science*, 105: 521~535.
- Fan Hongpeng, Zhu Weiguang, Li Zhengxiang, Zhong Hong, Bai Zhongjie, He Defeng, Chen Caijie, Cao Chongyong. 2013. Ca. 1.5 Ga mafic magmatism in South China during the break-up of the supercontinent Nuna/Columbia: The Zhuqing Fe-Ti-V oxide ore-bearing mafic intrusions in western Yangtze Block. *Lithos*, 168~169: 85~98.
- Fu Yu, Wang Shengwei, Sun Xiaoming, Liao Zhenwen, Jiang Xiaofang, Ren Guangming, Zhou Bangguo, Guo Yang, Wang Zizheng. 2015. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and petrogeochemical features of Huangguayuan granite, Yuanmou, Yunnan Province and its geological implication. *Geological Review*, 61(2): 376~392 (in Chinese with English abstract).
- Gan Xiaochun, Li Huimin, Sun Dazhong, Jin Wenshan, Zhao Fengqing. 1995. A geochronological study on early Proterozoic granitic rocks, southwestern Zhejiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 14(1): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Yang Minggui, Ding Xiaozhong, Liu Yanxue, Liu Xun, Ling Lianhai, Zhang Chuanheng. 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of tuff in the Shuangqiaoshan and Heshangzhen groups in South China: constraints on the evolution of the Jiangnan Neoproterozoic orogenic belt. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1744~1751 (in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Pang Weihua, Liu Yanxue, Lu Songnian, Liu Yaorong, Chen Jun, Zhang Yuhai. 2011a. SHRIMP zircon U-Pb dating of metamorphic tuff from the Precambrian Cangxi Complex-Group in northeastern Hunan. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1479~1484 (in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Chen Jun, Ding Xiaozhong, Liu Yaorong, Zhang Chuanheng, Zhang Heng, Liu Yanxue, Pang Weihua, Zhang Yuhai. 2011b. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the tuff bed of Lengjiaxi and Banxi groups, northeastern Hunan; Constraints on the Wuling Movement. *Geological Bulletin of China*, 30(7): 1001~1008 (in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Yin Chongyu, Zhang Heng, Tang Feng, Ding Xiaozhong, Wang Yue, Zhang Chuanheng. 2015. SHRIMP zircon U-Pb dating of the Liubatang Formation in the Jinning area, Yunnan Province, and its implication for the Jinning Movement. *Geological Bulletin of China*, 34(9): 1595~1604 (in Chinese with English abstract).
- Gao Shan, Qiu Yumin, Ling Wenli, McNaughton N J, Groves D I. 2001. Single zircon U-Pb dating of the Kongling high-grade metamorphic terrain; Evidence for > 3.2 Ga old continental crust in the Yangtze craton. *Science China (Ser. D)*, 44: 326~335.
- Gao Shan, Yang Jie, Zhou Lian, Li Ming, Hu Zhaochu, Guo Jingliang, Yuan Honglin, Gong Hujun, Xiao Gaoqiang, Wei Junqi. 2011. Age and growth of the Archean Kongling terrain, South China, with emphasis on 3.3Ga granitoid neisses. *American Journal of Science*, 311: 153~182.
- Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Du Lilin, Wang Xinshe, Ren Liudong, Zhou Xiwen. 2007a. Chronology and tectonic environment of the Tianbaoshan Formation; New evidence from zircon SHRIMP U-Pb age and geochemistry. *Geological Review*, 53(4): 556~563 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, Ren Liudong Du Lilin, Zhou Xiwen. 2007b. Age of crustal basement in western margin of Yangtze terrane. *Geological Journal of China*

- Universities, 13(3): 429 ~ 441 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, Du Lilin, Ren Liudong, Zhou Xiwen. 2008. Metamorphic Basement Evolution in Western Margin of Yangtze Block. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 215 (in Chinese without English abstract).
- Geng Yuansheng, Liu Yongqing, Gao Linzhi, Peng Nan, Jiang Xiaojun. 2012. Chronology of the Mesoproterozoic Tong' an Formation in southwestern margin of Yangtze Craton: New evidence from zircon LA-ICP-MS U-Pb ages. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1479~1490 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng. 2015. Neoproterozoic Era of South China Craton. In: Zhai Mingguo(ed.), *Precambrian Geology of China*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 263~301.
- Greentree M R, Li Zhengxiang, Li Xianhua, Wu Huaichun. 2006. Late Mesoproterozoic to earliest Neoproterozoic basin record of the Sibao orogenesis in western South China and relationship to the assembly of Rodinia. *Precambrian Research*, 151: 79~100.
- Greentree M R, Li Zhengxiang. 2008. The oldest known rocks in south western China: SHRIMP U-Pb magmatic crystallization age and detrital provenance analysis of the Paleoproterozoic Dahongshan Group. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33: 290~302.
- Gu Xueda, Liu Xiaohu, Li Zongfan. 1997. *Sichuan Lithostratigraphic*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~49 (In Chinese without English abstract).
- Guan Junlei, Zheng Lailin, Liu Jianhui, Sun Zhiming, Cheng Wanhua. 2011. Zircons SHRIMP U-Pb dating of diabase from Hekou, Sichuan Province, China, and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 85(4): 482 ~ 490 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jingliang, Gao Shan, Wu Yuanbao, Li Ming, Chen Kang, Hu Zhaochu, Liang Zhengwei, Liu Yongsheng, Zhou Lian, Zong Keqing, Zhang Wen, Chen Haihong. 2014. 3. 4 Ga granitic gneisses from the Yangtze Craton, South China: Implications for early Archean crustal growth. *Precambrian Research*, 242: 82~95.
- Guo Jingliang, Wu Yuanbao, Gao Shan, Jin Zhenmin, Zong Keqing, Hu Zhaochu, Chen Kang, Chen Haihong, Liu Yongsheng. 2015. Episodic Paleoproterozoic (3.3 ~ 2.0 Ga) granitoid magmatism in Yangtze Craton, South China: Implications for late Archean tectonics. *Precambrian Research*, 270: 246~266.
- Guo Yang, Wang Shengwei, Sun Xiaoming, Wang Zizheng, Yang Bin, Liao Zhenwen, Zhou Bangguo, Jiang Xiaofang, Hou Lin, Yang Bo. 2014. The Paleoproterozoic breakup event in the Southwest Yangtze Block: Evidence from U-Pb zircon age and geochemistry of diabase in Wuding, Yunnan province, SW China. *Acta Geologica Sinica*, 88(9): 1651~1665 (in Chinese with English abstract).
- He Zhengwei, Wei Xiangui, Wu Dechao, Liu Yuanchao. 1997a. A discussion on petrological - geochemical characteristics and age of the Huodiya Group in the south Michang Shan mountains. *Acta Geologica Sichuan*, 16(1): 8 ~ 16 (in Chinese with English abstract).
- He Zhengwei, Liu Yuanchao, Wei Xiangui, Xiao Yuanpu, Ma Runze, Wu Dechao. 1997b. Isotopic geochronology of basement metamorphic rock series in the Micangshan area along the northern margin of Yangtze Craton, China. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 17(supplement): 83~87 (in Chinese with English abstract).
- Hou Lin, Ding Jun, Deng Jun, Liao Zhenwen, Peng Huijuan. 2013. Zircon LA-ICP-MS dating of the magmatic breccia from the Yinachang iron-copper deposit in Wuding County of Yunnan Province and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 32(4): 580~588 (in Chinese with English abstract).
- Hu Aiqin, Zhu Bingquan, Mao Cunciao, Zhu Naijuan, Huang Rongsheng. 1991. Geochronology of the Dahongshan Group. *Chinese Journal of Geochemistry*, 10(3): 195~203.
- Hu Xiongjian, Xu Jinkun, Tong Chaoxu. 1991. The Precambrian geology of southwestern Zhejiang Province. Beijing: Geological Publishing House, 1~278 (in Chinese with English abstract).
- Hu Zhengxiang, Mao Xinwu, Tian Wangxue, Li Xiongwei. 2015. Discovery of the Jinningian Orogenic Belt on the northern margin of Yangtze Craton in mountain Dahong. *Geological Survey of China*, 2(2): 33~39 (in Chinese with English abstract).
- Hua Youren. 1995. Crust evolution and stratigraphic correlation of Yangtze Plate. *Geology and Prospecting*, 31(2): 15 ~ 22 (in Chinese with English abstract).
- Jian Ping, Liu Dunyi, Zhang Qi, Zhang Fuqin, Shi Yuruo, Shi Guanghai, Zhang Lüqiao, Tao Hua. 2003. SHRIMP dating of ophiolite and leucocratic rocks within ophiolite. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 439~456 (in Chinese with English abstract).
- Jian Ping, Liu Dunyi, Sun Xiaomeng. 2004. SHRIMP dating of Jicha Alaskan -type gabbro in West Yunnan Province, Evidence of the Early Permian subduction. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 166~170 (in Chinese with English abstract).
- Lan Zhongwu, Li Xianhua, Zhu Maoyan, Zhang Qirui, Li Qiuli. 2015. Revisiting the Liantuo Formation in Yangtze Block, South China: SIMS U-Pb zircon age constraints and regional and global significance. *Precambrian Research*, 263: 123~141.
- Li Fuhua, Tan Jiaming, Shen Yulian, Wang Fuxing, Zhou Guofu, Pan Xingnan, Li Xingzhen. 1988. The Kangdian Region Pre-Sinian. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1 ~ 396 (in Chinese with English abstract).
- Li Huaikun, Zhu Shixing, Xiang Zhenqun, Su Wenbo, Lu Songnian, Zhou Hongying, Geng Jianzhen, Li Sheng, Yang Fengjie. 2010. Zircon U-Pb dating on tuff bed from Gaoyuzhuang formation in Yanqing, Beijing: Further constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphy in the northern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2131~2140 (in Chinese with English abstract).
- Li Huaikun, Zhang Chuanlin, Yao Chunyan, Xiang Zhenqun.

- 2013a. U-Pb zircon age and Hf isotope compositions of Mesoproterozoic sedimentary strata on the western margin of the Yangtze massif. *Science China: Earth Sciences*, 56: 628~639.
- Li Huaikun, Zhang Chuanlin, Xiang Zhenqun, Lu Songnian, Zhang Jian, Geng Jianzhen, Qu Lesheng, Wang Zhixian. 2013b. Zircon and baddeleyite U-Pb geochronology of the Shennongjia Group in the Yangtze Craton and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 673~697 (in Chinese with English abstract).
- Li Huaikun, Tian Hui, Zhou Hongying, Zhang Jian, Liu Huan, Geng Jianzhen, Ye Lijuan, Xiang Zhenqun, Qu Lesheng. 2016. Correlation between the Dagushi Group in the Dahongshan area and the Shennongjia Group in the Shennongjia area on the northern margin of the Yangtze Craton: Constraints from zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopic systematics. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 186~201 (in Chinese with English abstract).
- Li Longming, Lin Shoufa, Davis D W, Xiao Wenjiao, Xing Guangfu, Yin Changqing. 2014. Geochronology and geochemistry of igneous rocks from the Kongling terrane: Implications for Mesoarchean to Paleoproterozoic crustal evolution of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 255: 30~47.
- Li Quan, Leng Jian. 1987. The Upper Precambrian in the Shennongjia Region. Tianjin: Science and Technology Publishing House, 1~503 (in Chinese with English summary).
- Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxiang, Lo Chinghua, Wang Jian, Ye Meifang, Yang Yueheng. 2009. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages, geochemistry and Nd-Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks. *Precambrian Research*, 174: 117~128.
- Li Xiji, Wu Maode, Duan Jinsun. 1984. The stratigraphic sequence of the Kunyang Group and its top and bottom boundaries. *Geological Review*, 30(5): 399~408 (in Chinese with English abstract).
- Li Zeqin, Wang Jiangzhen, Liu Jiajun, Li Chaoyang, Du Andao, Liu Yuping, Ye Lin. 2003. Re-Os dating of molybdenite from Lala Fe-Oxide-Cu-Au-Mo-REE deposit, southwest China: implications for ore genesis. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 18(1): 39~42 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhengxiang, Li Xianhua, Zhou Hanwen, Kinny P D. 2002. Grenvillian continental collision in south China: new SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia. *Geology*, 30(2): 163~166.
- Li Zhengxiang, Wartho J A, Occhipinti S, Zhang Chuanlin, Li Xianhua, Wang Jian, Bao Chaomin. 2007. Early history of the eastern Sibao Orogen (South China) during the assembly of Rodinia: New mica $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and SHRIMP U-Pb detrital zircon provenance constraints. *Precambrian Research*, 159: 79~94.
- Ling Wenli, Zhou Lian, Zhang Hongfei, Oyang Jianping. 1996. Isotopic geochronology and crustal growth of Proterozoic basement along the northern margin of Yangtze Craton: II. the Huodiya Group. *Earth Science*, 21(5): 495~500 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chengxin, Mao Xinwu, Wei Yunxu, He Renliang, Yu Jianhua. 2004. A preliminary research on stratigraphic sequence of Shennongjia Group. *Resources Environment & Engineering*, 18(z1): 5~16 (in Chinese with English abstract).
- Liu Danyi, Jian Ping, Zhang Qi, Zhang Fuqin, Shi Yurao, Shi Guanghai, Zhang Lüqiao, Tao Hua. 2003. SHRIMP dating of adakites in the Tulingkai Ophiolite, Inner Mongolia: evidence for the Early Paleozoic subduction. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 317~327.
- Liu Li, Pan Longke, Du Yichao, Gong Zhiyu, Luo Fan. 2015. Geochemical characteristics and geological significance of Shicaohe volcanic rocks of Shennongjia Group in Western Hubei Province. *Resources Environment & Engineering*, 29(4): 370~376 (in Chinese with English abstract).
- Liu Rui, Zhou Hanwen, Zhang Li, Zhong Zengqiu, Zeng Wen, Xiang Hua, Jin Song, Lu Xinqian, Li Chunzhong. 2009. Paleoproterozoic reworking of ancient crust in the Cathaysia Block, South China: Evidence from zircon trace elements, U-Pb and Lu-Hf isotopes. *Chinese Science Bulletin*, 54(9): 1543~1554.
- Lü Shikun, Dai Henggui. 2001. A review of the set-up of Kunyang Group's sequence and the discovery of important ore-bearing horizons in Kang-Dian area. *Yunnan Geology*, 20(1): 1~24 (in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Li Huaikun, Xiang Zhenqun. 2010. Advances in the study of Mesoproterozoic geochronology in China: a review. *Geology in China*, 37(4): 1002~1013 (in Chinese with English abstract).
- Mu Chuanlong, Lin Shiliang, Yu Qian. 2000a. Sedimentation and evolution of the Mesoproterozoic Kunyang Group in the Huili-Huidong region, Sichuan and its adjacent areas. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 20(1): 44~51 (in Chinese with English abstract).
- Mu Chuanlong, Lin Shiliang, Zhou Minkui. 2000b. The study of the sequence stratigraphy of the Dongchuan group during Mesoproterozoic in Huili-Huidong and Dongchuan areas. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 20(1): 38~44 (in Chinese with English abstract).
- NCSC (National Commission Stratigraphy of China). 2014. Regional Chronostratigraphic Chart of China (Geologic time). Beijing: Geological Publishing House, 1 (in Chinese without English abstract).
- Pang Weihua, Ren Guangming, Sun Zhiming, Yin Fuguang. 2015. Division and correlation of Mesoproterozoic strata on the western margin of Yangtze block: Evidence from the U-Pb age of tuff zircon in the Tong'an Formation. *Geology in China*, 42(4): 921~936 (in Chinese with English abstract).
- Qian Jinhe, Shen Yuanren. 1990. The Dahongshan Volcanogenic

- Fe-Cu Deposit in Yunnan Province. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 183 (in Chinese without English abstract).
- Qiu Xiaofei, Ling Wenli, Liu Xiaoming, Kusky T, Berkana W, Zhang Yinghua, Gao Yongjuan, Lu Shansong, Kuang Hua, Liu Chengxin. 2011. Recognition of Grenvillian volcanic suite in the Shennongjia region and its tectonic significance for the South China Craton. *Precambrian Research*, 191: 101~119.
- Qiu Yansheng, Hu Zhengxiang, Yang Qingxiong, Zhou Shiqing, Tian Wangxue, Li Xiongwei. 2013. LA-ICP-MS U-Pb dating for the Macaoyuan Group in South China and its stratigraphic significance. *Resources Environment & Engineering*, 27(3): 328~334 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Yumin, Gao Shan, McNaughton N J, Groves D I, Ling Wenli. 2000. 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. *Geology*, 28(1): 11~14.
- Ren Guangming, Pang Weihua, Sun Zhiming, Yin Fuguang. 2014. Zircon U-Pb chronology of the amphibolite of Tong'an Formation and its geological significance. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 34(2): 33~39 (in Chinese with English abstract).
- Shi Yuruo, Liu Dunyi, Zhang Zongqing, Miao Laicheng, Zhang Fuqin, Xue Hongmei. 2007. SHRIMP zircon U-Pb dating of gabbro and granite from the Huashan ophiolite, Qinling orogenic belt, China: Neoproterozoic suture on the northern margin of the Yangtze Craton. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 81(2): 239~243.
- Shu Liangshu, Faure M, Yu Jinhai, Jahn Borming. 2011. Geochronological and geochemical features of the Cathaysia Block (South China): new evidence for the Neoproterozoic breakup of Rodinia. *Precambrian Research*, 187: 263~276.
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, Wang Yu, Mo Shenguo, Zhao Ziran, Zhu Zhixin, Pan Chenze. 2002. Discussion on making zircon SHRIMP target, dating age and relative phenomena. *Geological Review*, 48(supplement): 26~30 (in Chinese with English abstract).
- Su Wenbo. 2016. Revision of the Mesoproterozoic chronostratigraphic subdivision both of North China and Yangtze Cratons and the relevant issues. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 156~185 (in Chinese with English abstract).
- Sun Weihua, Zhou Meifu, Gao Jianfeng, Yang Yueheng, Zhao Xinfu, Zhao Junhong. 2009. Detrital zircon U-Pb geochronological and Lu-Hf isotopic constraints on the Precambrian magmatic and crustal evolution of the western Yangtze Block, SW China. *Precambrian Research*, 172: 99~126.
- Sun Zhiming, Yin Fuguang, Guan Junlei, Liu Jianhui, Li Junmin, Geng Quanru, Wang Liquan. 2009. SHRIMP U-Pb dating and its stratigraphic significance of tuff zircon from Heishan Formation of Kunyang Group, Dongchuan area, Yunnan Province, China. *Geological Bulletin of China*, 28(7): 896~900 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dongbing, Sun Zhiming, Yin Fuguang, Wang Liquan, Wang Baodi, Zhang Wanping. 2012. Geochronology of the Hekou Group on the western margin of the Yangtze Block: evidence from zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of volcanic rock. *Journal of Stratigraphy*, 36(3): 630~635 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dongbing, Yin Fuguang, Sun Zhiming, Wang Liquan, Wang Baodi, Liao Shiyong, Tang Yuan, Ren Guangming. 2013. 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*, 32(4): 617~630 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jian, Deng Qi, Wang Zhengjiang, Qiu Yansheng, Duan Taizhong, Jiang Xinsheng, Yang Qingxiong. 2013. New evidences for sedimentary attributes and timing of the "Macaoyuan conglomerates" on the northern margin of the Yangtze block in Southern China. *Precambrian Research*, 235: 58~70.
- Wang Kaiyuan. 1998. A survey of the geological study on the Precambrian in Yunnan. *Yunnan Geology*, 17(1): 91~99 (in Chinese with English abstract).
- Wang Kenan. 1982. Geochemical characteristics of sedimentation and metamorphism of Dongchuan copper deposit, Yunnan Province. *Mineral Deposits*, 1(1): 61~68 (in Chinese with English abstract).
- Wang Lijuan, Yu Jinhai, Griffin W L, O'Reilly S Y. 2012. Early crustal evolution in the western Yangtze Block: Evidence from U-Pb and Lu-Hf isotopes on detrital zircons from sedimentary rocks. *Precambrian Research*, 222~223: 368~385.
- Wang Shengwei, Liao Zhenwen, Sun Xiaoming, Jiang Xiaofang, Zhou Bangguo, Guo Yang, Luo Maojin, Zhu Huaping, Ma Dong. 2013. Geochemistry of Paleoproterozoic diabases in the Dongchuan Copper Deposit, Yunnan, SW China: Response to breakup of the Columbia supercontinent in the southwestern margin of Yangtze Block. *Acta Geologica Sinica*, 87(12): 1834~1852 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shengwei, Jiang Xiaofang, Yang Bo, Sun Xiaoming, Liao Zhenwen, Zhou Qing, Guo Yang, Wang Zizheng, Yang Bin. 2016. The Proterozoic tectonic movement in Kangdian area I: Kunyang intracontinental rift, mantle plume and its metallogenesis. *Geological Review*, 62(6): 1353~1377 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wei, Zhou Meifu, Zhao Xinfu, Chen W T, Yan Danping. 2014a. Late Paleoproterozoic to Mesoproterozoic rift successions in SW China: Implication for the Yangtze Block-North Australia-Northwest Laurentia connection in the Columbia supercontinent. *Sedimentary Geology*, 309: 33~47.
- Wang Wei, Zhou Meifu. 2014b. Provenance and tectonic setting of the Paleo- to Mesoproterozoic Dongchuan Group in the southwestern Yangtze Block, South China: Implication for the

- breakup of the supercontinent Columbia. *Tectonophysics*, 610: 110~127.
- Wang Xiaolei, Zhao Guochun, Zhou Jincheng, Liu Yongsheng, Hu Jian. 2008. Geochronology and Hf isotopes of zircon from volcanic rocks of the Shuangqiaoshan Group, South China: implications for the Neoproterozoic tectonic evolution of the eastern Jiangnan orogen. *Gondwana Research*, 14: 355~367.
- Wang Xinchui, Gao Jun, Klemd R, Jiang Tuo, Zhai Qingguo, Xiao Xuchang, Liang Xinquan. 2015. Early Neoproterozoic multiple arc- back-arc system formation during subduction - accretion processes between the Yangtze and Cathaysia blocks: New constraints from the supra-subduction zone NE Jiangxi ophiolite (South China). *Lithos*, 236~237: 90~105.
- Wang Zhengjiang, Wang Jian, Du Qiuding, Deng Qi, Yang Fei. 2013. Mature Archean continental crust in the Yangtze Craton: Evidence from petrology, geochronology and geochemistry. *Chinese Science Bulletin*, 58(19): 2360~2369.
- Wang Zhengjiang, Wang Jian, Deng Qi, Du Qiuding, Zhou Xiaolin, Yang Fei, Liu Hao. 2015. Paleoproterozoic I-type granites and their implications for the Yangtze block position in the Columbia supercontinent: Evidence from the Lengshui Complex, South China. *Precambrian Research*, 263: 157~173.
- Wang Zizheng, Guo Yang, Yang Bin, Wang Shengwei, Sun Xiaoming, Hou Lin, Zhou Bangguo, Liao Zhenwen. 2013. Discovery of the 1.73Ga Haizi anorogenic type granite in the western margin of Yangtze Craton, and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 87(7): 931~942 (in Chinese with English abstract).
- Wu Maode, Duan Jinsun, Song Xueliang, Chen Liangzhong, Dan Yunqing. 1990. *Geology of Kunyang Group in Yunnan Province*. Kunming: Scientific Press of Yunnan Province, 1~265 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao, Gao Shan, Zhang Hongfei, Zheng Jianping, Liu Xiaochi, Wang Hao, Gong Hujun, Zhou Lian, Yuan Honglin. 2012. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of Paleoproterozoic arc related granitoid in the northwestern Yangtze Block and its geological implications. *Precambrian Research*, 200~203: 26~37.
- Xiong Xingwu, Chen Yiyuan. 1991. Sedimentary features and its significance of tectono-paleogeography of Dagushi Group, Jingshan, Hubei Province. *Earth Science*, 16(5): 489~495 (in Chinese with English abstract).
- Xu Daliang, Liu Hao, Wei Yunxu, Peng Lianhong, Deng Xin. 2016. Detrital zircon U-Pb dating of Zhengjiaya Formation from the Shennongjia area in the northern Yangtze Block and its tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2648~2660 (in Chinese with English abstract).
- Xu Youhua, Wu Xinhua, Lou Fasheng. 2008. Division and correlation of the Middle Proterozoic strata in Jiangnan Old Land. *Resources Surces Survey and Environment*, 29(1): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Yang Bin, Wang Weiqing, Dong Guochen, Guo Yang, Wang Zizheng, Hou Lin. 2015. Geochemistry, geochronology and their significances of Haizi bimodal intrusions in Kangdian fault-uplift zone, southwestern margin of Yangtze platform. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5): 1361~1373 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hong, Liu Fulai, Du Lili, Liu Pinghua, Wang Fang. 2012. Zircon U-Pb dating for metavolcanites in the Laochanghe Formation of the Dahongshan Group in southwestern Yangtze block, and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2994~3014 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yaomin, Tu Guangzhi, Hu Ruizhong, Shi Xuefa. 2005. Sm-Nd isotopic geochronology of the Yinachang Fe-Cu-REE deposit at Wuding, Yunnan Province and its genetic significance. *Chinese Science Bulletin*, 50: 2090~2096.
- Yin Fuguang, Sun Zhiming, Bai Jianke. 2011a. Stratigraphic framework of the Mesoproterozoic in Dongchuan and central Yunnan region. *Journal of Stratigraphy*, 35(1): 49~54 (in Chinese with English abstract).
- Yin Fuguang, Sun Zhiming, Zhang Zhang. 2011b. Mesoproterozoic stratigraphic - structure framework in Huili - Dongchuan area. *Geological Review*, 57(6): 770~778 (in Chinese with English abstract).
- Yin Fuguang, Sun Zhiming, Ren Guangming, Wang Dongbing. 2012a. Geological record of Paleo-and Mesoproterozoic orogenesis in the western margin of Upper Yangtze Block. *Acta Geologica Sinica*, 86(12): 1917~1932 (in Chinese with English abstract).
- Yin Fuguang, Wang Dongbing, Sun Zhiming, Ren Guangming, Pang Weihua. 2012b. Columbia supercontinent: New insights from the western margin of the Yangtze landmass. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32(3): 31~40 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jinhai, Wang Lijuan, O'Reilly S, Griffin W, Zhang Ming, Li Chunzhong, Shu Liangshu. 2009. A Paleoproterozoic orogeny recorded in a long-lived cratonic remnant (Wuyishan terrane), eastern Cathaysia Block, China. *Precambrian Research*, 174(3~4): 347~363.
- Zhang Chuanheng, Gao Linzhi, Wu Zhenjie, Shi Xiaoying, Yan Quanren, Li Dajian. 2007. SHRIMP U-Pb zircon age of tuff from the Kunyang Group in central Yunnan: Evidence for Grenvillian orogeny in South China. *Chinese Science Bulletin*, 52(11): 1517~1525.
- Zhang Chuanlin, Zuo Haibo, Zhu Qingbo, Chen Xiangyan. 2015. Late Mesoproterozoic to early Neoproterozoic ridge subduction along southern margin of the Jiangnan Orogen: New evidence from the northeastern Jiangxi Ophiolite (NJO), South China. *Precambrian Research*, 268: 1~15.
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Wang Yuejun, Li Sanzhong, Dong Yunpeng, Liu Shaofeng, He Dengfa, Cheng Shunyou, Lu Rukui, Yao Anping. 2013. Tectonics of South China Continent and its implications. *Science China: Earth Sciences*, 56: 1804~1828.

- Zhang Lijuan, Ma Changqian, Wang Lianxun, She Zhenbing, Wang Shiming. 2011. Discovery of Paleoproterozoic rapakivi granite on the northern margin of the Yangtze block and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 56(3): 306~318.
- Zhang Shaobing, Zheng Yongfei, Wu Yuanbao, Zhao Zifu, Gao Shan, Wu Fuyuan. 2006. Zircon isotope evidence for ≥ 3.5 Ga continental crust in the Yangtze Craton of China. *Precambrian Research*, 146: 16~34.
- Zhao Chezhong, Liu Zhaochang, Li Fanyou. 1999. The characteristics of Huili- Dongchuan Proterozoic marine volcanic rock zone and its tectonic setting. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 19(2): 17~24 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Guochun. 2015. Jiangnan Orogen in South China: Developing from divergent double subduction. *Gondwana Research*, 27(3): 1173~1180.
- Zhao Lei, Zhou Xiwen, Zhai Mingguo, Santosh M, Ma Xudong, Shan Houxiang, Cui Xiahong. 2014. Paleoproterozoic tectonic transition from collision to extension in the eastern Cathaysia Block, South China: evidence from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Nd-Hf isotopes of a granite-charnockite suite in southwestern Zhejiang. *Lithos*, 184~187: 259~280.
- Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Li Jianwei, Sun Min, Gao Jianfeng, Sun Weihua, Yang Jinhui. 2010. Late Paleoproterozoic to early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China: Implications for tectonic evolution of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 182: 57~69.
- Zhao Xinfu, Zhou Meifu. 2011. Fe-Cu deposits in the Kangdian region, SW China: a Proterozoic IOCG (iron-oxide-copper-gold) metallogenic province. *Mineral Deposita*, 46: 731~747.
- Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Hitzman M W, Li Jianwei, Bennett M, Meighan C, Anderson E. 2012. Late Paleoproterozoic to Early Mesoproterozoic Tangdan sedimentary rock-hosted strata-bound copper deposit, Yunnan Province, Southwest China. *Economic Geology*, 107: 357~375.
- Zhao Yinsheng, Li Jinhua. 1987. Micropalaeoflora of Dagushi Group in northern Hubei and its stratigraphic division and correlation. *Geology in Hubei Province*, 1(1): 11~27 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Chuanming. 2016. Neoproterozoic lithostratigraphy and correlation across the Yangtze Block, South China. *Journal of Stratigraphy*, 40(2): 120~135 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jiayun, Mao Jingwen, Liu Feiyang, Tan Hongqi, Shen Bing, Zhu Zhimin, Chen Jiabiao, Luo Liping, Zhou Xiong, Wang Yue. 2011. SHRIMP U-Pb zircon chronology and geochemistry of albitite from the Hekou Group in the western Yangtze Block. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 31(3): 66~73 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jincheng, Wang Xiaolei, Qiu Jiansheng. 2009. Geochronology of Neoproterozoic mafic rocks and sandstones from northeastern Guizhou, South China: coeval arc magmatism and sedimentation. *Precambrian Research*, 170: 27~42.
- Zhou Meifu, Yan Danping, Kennedy A K, Li Yunqian, Ding Jun. 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: 51~67.
- Zhou Meifu, Zhao Xinfu, Chen W T, Li Xiaochun, Wang Wei, Yan Danping, Qiu Huaning. 2014. Proterozoic Fe-Cu metallogeny and supercontinental cycles of the southwestern Yangtze Block, southern China and northern Vietnam. *Earth Science Reviews*, 139: 59~82.
- Zhu Bingquan, Chang Xiangyang, Qiu Huaning, Wang Jianghai, Deng Shangxian. 2001. Geochronological study on formation and metamorphism of Precambrian basement and their mineralization in Yunnan, China. *Progress in Precambrian Research*, 24(2): 75~82 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Huaping, Zhou Bangguo, Wang Shengwei, Luo Maojin, Liao Zhenwen, Guo Yang. 2011a. Detrital zircon U-Pb dating by LA-ICP-MS and its geological significance in western margin of Yangtze terrane. *Journal Mineralogy Petrology*. 31(1): 70~74 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Huaping, Fan Wenyu, Zhou Bangguo, Wang Shengwei, Luo Maojin, Liao Zhenwen, Guo Yang. 2011b. Assessing Precambrian stratigraphic sequence of Dongchuan area: Evidence from zircon SHRIMP and LA-ICP-MS dating. *Geological Journal of China Universities*, 17(3): 452~461 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Weiguang, Zhong Hong, Li Zhengxiang, Bai Zhongjie, Yang Yijin. 2016. SIMS zircon U-Pb ages, geochemistry and Nd-Hf isotopes of ca. 1.0 Ga mafic dykes and volcanic rocks in the Huili area, SW China: Origin and tectonic significance. *Precambrian Research*, 273: 67~89.
- Zhu Zhimin, Hou Kejun, Zhu Kongyang, Tan Hongqi. 2013. Geochronology and geochemistry of the Hekou group in Sichuan province, SW China. *Geochemical Journal*, 47: 51~64.

参 考 文 献

- 柏道远, 贾宝华, 刘伟, 陈必河, 刘耀荣, 张晓阳. 2010. 湖南城步火成岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其对江南造山带新元古代构造演化的约束. *地质学报*, 84(12): 1715~1726.
- 常向阳, 朱炳泉, 孙大中, 邱宁华, 邹日. 1997. 东川铜矿床同位素地球化学研究: I. 地层年代与铅同位素化探应用. *地球化学*, 26(2): 32~38.
- 陈根文, 夏斌. 2001. 四川拉拉铜矿床成因研究. *矿物岩石地球化学通报*, 20(1): 42~44.
- 陈志洪, 邢光福, 郭坤一, 董永观, 陈荣, 曾勇, 李龙明, 贺振宇, 赵玲. 2009. 浙江平水群角斑岩的成因: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约. *科学通报*, 54(5): 610~617.
- 程裕淇主编. 1994. 中国区域地质概论. 北京: 地质出版社, 1~517.
- 戴恒贵. 1997. 康滇地区昆阳群和会理群地层、构造及找矿靶区研究. *云南地质*, 16(1): 1~39.
- 付宇, 王生伟, 孙晓明, 廖震文, 蒋小芳, 任光明, 周邦国, 郭阳, 王子

- 正. 2015. 云南元谋县黄瓜园花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和岩石地球化学及其地质意义. 地质论评, 61(2): 376~392.
- 甘晓春, 李惠民, 孙大中, 金文山, 赵凤清. 1995. 浙西南早元古代花岗岩质岩石的年代. 岩石矿物学杂志, 14(1): 1~8.
- 高林志, 杨明桂, 丁孝忠, 刘燕学, 刘训, 凌联海, 张传恒. 2008. 华南双桥山群和河上镇群凝灰岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄——对江南新元古代造山带演化的制约. 地质通报, 27(10): 1744~1751.
- 高林志, 丁孝忠, 庞维华, 刘燕学, 陆松年, 刘耀荣, 陈峻, 张玉海. 2011a. 湘东北前寒武纪仓溪岩群变凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄. 地质通报, 30(10): 1479~1484.
- 高林志, 陈峻, 丁孝忠, 刘耀荣, 张传恒, 张恒, 刘燕学, 庞维华, 张玉海. 2011b. 湘东北岳阳地区冷家溪群和板溪群凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄: 对武陵运动的制约. 地质通报, 30(7): 1001~1008.
- 高林志, 尹崇玉, 张恒, 唐烽, 丁孝忠, 王约, 张传恒. 2015. 云南晋宁地区柳坝塘组凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对晋宁运动的制约. 地质通报, 34(9): 1595~1604.
- 耿元生, 杨崇辉, 杜利林, 王新社, 任留东, 周喜文. 2007a. 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. 地质论评, 53(4): 556~563.
- 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 任留东, 杜利林, 周喜文. 2007b. 扬子地台北西缘结晶基底的时代. 高校地质学报, 13(3): 429~441.
- 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 杜利林, 任留东, 周喜文. 2008. 扬子地台北西缘变质基底演化. 北京: 地质出版社, 1~215.
- 耿元生, 柳永清, 高林志, 彭楠, 江小均. 2012. 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. 地质学报, 86(9): 1479~1490.
- 辜学达, 刘啸虎, 李宗凡. 1997. 四川省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~49.
- 关俊雷, 郑来林, 刘建辉, 孙志明, 程万华. 2011. 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. 地质学报, 85(4): 482~490.
- 广西壮族自治区地质矿产局. 1985. 广西壮族自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1~853.
- 郭阳, 王生伟, 孙晓明, 王子正, 杨斌, 廖震文, 周邦国, 蒋小芳, 侯林, 杨波. 2014. 扬子地台北西南缘古元古代末的裂解事件——来自武定地区辉绿岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学证据. 地质学报, 88(9): 1651~1665.
- 何政伟, 魏显贵, 吴德超, 刘援朝. 1997a. 南米仓山火地垭群岩石地球化学特征及时代探讨. 四川地质学报, 16(1): 8~16.
- 何政伟, 刘援朝, 魏显贵, 肖渊甫, 马润则, 吴德超. 1997b. 扬子克拉通北缘米仓山地区基底变质岩系同位素地质年代学. 矿物岩石, 17(增刊), 83~87.
- 侯林, 丁俊, 邓军, 廖震文, 彭惠娟. 2013. 云南武定迤纳厂铁铜矿岩浆角砾岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其意义. 地质通报, 32(4): 580~588.
- 胡雄健, 许金坤, 童朝旭. 1991. 浙西南前寒武纪地质. 北京: 地质出版社, 1~278.
- 胡正祥, 毛新武, 田望学, 李雄伟. 2015. 扬子陆块北缘大洪山地区发现晋宁期造山带. 中国地质调查, 2(2): 33~39.
- 湖北省地质矿产局. 1990. 湖北省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1~705.
- 湖南省地质矿产局. 1988. 湖南省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1~718.
- 花友仁. 1995. 扬子板块的地壳演化与地层对比. 地质与勘探, 31(2): 15~22.
- 简平, 刘敦一, 张旗, 张福勤, 石玉若, 施光海, 张履桥, 陶华. 2003. 蛇绿岩及蛇绿岩中浅色岩的 SHRIMP U-Pb 测年. 地学前缘, 10(4): 439~456.
- 简平, 刘敦一, 孙晓猛. 2004. 滇西吉岔阿拉斯加型辉长岩 SHRIMP 测年: 早二叠世俯冲事件的证据. 地质学报, 78(2): 166~170.
- 江西省地质矿产局. 1984. 江西省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1~921.
- 李复汉, 覃嘉铭, 申玉连, 玉福星, 周国富, 潘杏南, 李兴振. 1988. 康滇地区的前震旦系. 重庆: 重庆出版社, 1~396.
- 李怀坤, 朱士兴, 相振群, 苏文博, 陆松年, 周红英, 耿建珍, 李生, 杨锋杰. 2010. 北京延庆高子庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束. 岩石学报, 26(7): 2131~2140.
- 李怀坤, 张传林, 相振群, 陆松年, 张健, 耿建珍, 瞿乐生, 王志先. 2013b. 扬子克拉通神农架群锆石和斜锆石 U-Pb 年代学及其构造意义. 岩石学报, 29(2): 673~697.
- 李怀坤, 田辉, 周红英, 张健, 刘欢, 耿建珍, 叶丽娟, 相振群, 瞿乐生. 2016. 扬子克拉通北缘大洪山地区打鼓石群与神农架地区神农架群的对比: 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及 Hf 同位素证据. 地学前缘, 23(6): 186~201.
- 李铨, 冷坚主编. 1987. 神农架上前寒武系. 天津: 天津科学技术出版社, 1~503.
- 李希勤, 吴懋德, 段锦荪. 1984. 昆阳群层序及顶底问题. 地质论评, 30(5): 399~408.
- 李泽琴, 王奖臻, 刘家军, 李朝阳, 杜安道, 刘玉平, 叶琳. 2003. 拉铁氧化物-铜-金-钼-稀土矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 地质找矿论丛, 18(1): 39~42.
- 凌文黎, 周炼, 张宏飞, 欧阳建平. 1996. 扬子克拉通北缘元古宙基底同位素地质年代学和地壳增生历史: II. 火地垭群. 地球科学, 21(5): 495~500.
- 刘成新, 毛新武, 魏运许, 何仁亮, 余建华. 2004. 神农架群地层层序初探. 资源环境与工程, 18(z1): 5~16.
- 刘力, 潘龙克, 杜翌超, 龚志恩, 罗凡. 2015. 鄂西神农架群石槽河组火山岩地球化学特征及地质意义. 资源环境与工程, 29(4): 370~376.
- 陆松年, 李怀坤, 相振群. 2010. 中国中元古代同位素地质年代学研究进展述评. 中国地质, 37(4): 1002~1013.
- 吕世琨, 戴恒贵. 2001. 康滇地区建立昆阳群(会理群)层序的回顾和重要赋矿层位的发现. 云南地质, 20(1): 1~24.
- 牟传龙, 林仕良, 余谦. 2000a. 四川会理一会东及邻区中元古界昆阳群沉积特征及演化. 沉积与特提斯地质, 20(1): 44~51.
- 牟传龙, 林仕良, 周铭魁. 2000b. 会理一会东及邻区中元古代东川群层序地层分析. 矿物岩石, 20(1): 38~44.
- 庞维华, 任光明, 孙志明, 尹福光. 2015. 扬子地块西缘古一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. 中国地质, 42(4): 921~936.

钱锦和, 沈远仁. 1990. 云南大红山古火山岩铁铜矿. 北京: 地质出版社, 1~183.

邱艳生, 胡正祥, 杨青雄, 周世卿, 田望学, 李雄伟. 2013. 华南“马槽园群”年代及其地层学意义. 资源环境与工程, 27(3): 328~334.

全国地层委员会. 2014. 中国地层表. 北京: 地质出版社, 1

任光明, 庞维华, 孙志明, 尹福光. 2014. 扬子西缘会理地区通安组角闪岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 矿物岩石, 34(2): 33~39.

四川省地质矿产局. 1991. 四川省区域地质志. 北京: 地质出版社. 1~730.

宋彪, 张玉海, 万渝生, 王瑜, 莫申国, 赵子然, 朱志新, 潘成泽. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 48(增刊): 26~30.

苏文博. 2016. 华北及扬子克拉通中元古代年代地层格架厘定及相关问题探讨. 地学前缘, 23(6): 156~185.

孙志明, 尹福光, 关俊雷, 刘建辉, 李军敏, 耿全如, 王立全. 2009. 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. 地质通报, 28(7): 896~900.

王冬兵, 孙志明, 尹福光, 王立全, 王保弟, 张万平. 2012. 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. 地层学杂志, 36(3): 630~635.

王冬兵, 尹福光, 孙志明, 王立全, 王保弟, 廖世勇, 唐渊, 任光明. 2013. 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. 地质通报, 32(4): 617~630.

王铠元. 1998. 云南前寒武纪地质研究概论. 云南地质, 17(1): 91~99.

王可南. 1982. 云南东川铜矿床沉积变质作用的地球化学. 矿床地质, 1(1): 61~68.

王生伟, 廖震文, 孙晓明, 蒋小芳, 周邦国, 郭阳, 罗茂金, 朱华平, 马东. 2013. 云南东川铜矿区古元古代辉绿岩地球化学——Columbia 超级大陆裂解在扬子陆块西缘的响应. 地质学报, 87(12): 1834~1852.

王生伟, 蒋小芳, 杨波, 孙晓明, 廖震文, 周清, 郭阳, 王子正, 杨斌. 2016. 康滇地区元古宙构造运动 I: 昆阳陆内裂谷、地幔柱及其成矿作用. 地质论评, 62(6): 1353~1377.

王子正, 郭阳, 杨斌, 王生伟, 孙晓明, 侯林, 周邦国, 廖震文. 2013. 扬子克拉通西缘 1.73Ga 非造山型花岗斑岩的发现及其地质意义. 地质学报, 87(7): 931~942.

吴懋德, 段锦荪, 宋学良, 陈良忠, 但韵清. 1990. 云南昆阳群地质. 昆明: 云南科技出版社. 1~265.

熊兴武, 陈忆元. 1991. 湖北京山中元古界打鼓石群沉积特征及其构造古地理意义. 地球科学, 16(5): 489~495.

徐大良, 刘浩, 魏运许, 彭练红, 邓新. 2016. 扬子北缘神农架地区郑家垭组碎屑锆石年代学及其构造意义. 地质学报, 90(10): 2648~2660.

徐有华, 吴新华, 楼法生. 2008. 江南古陆中元古代地层的划分与对比. 资源调查与环境, 29(1): 1~11.

杨斌, 王伟清, 董国臣, 郭阳, 王子正, 侯林. 2015. 扬子地台西南缘康滇断隆带海孜双峰式侵入岩体年代学—地球化学及其地质意义. 岩石学报, 31(5): 1361~1373.

杨红, 刘福来, 杜利林, 刘平华, 王舫. 2012. 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. 岩石学报, 28(9): 2994~3014.

尹福光, 孙志明, 白建科. 2011a. 东川、滇中地区中元古代地层格架. 地层学杂志, 35(1): 49~54.

尹福光, 孙志明, 张璋. 2011b. 会理—东川地区中元古代地层—构造格架. 地质论评, 57(6): 770~778.

尹福光, 孙志明, 任光明, 王冬兵. 2012a. 上扬子陆块西南缘早—中元古代造山运动的地质记录. 地质学报, 86(12): 1917~1932.

尹福光, 王冬兵, 孙志明, 任光明, 庞维华. 2012b. 哥伦比亚超大陆在扬子陆块西缘的探秘. 沉积与特提斯地质, 32(3): 31~40.

赵彻终, 刘肇昌, 李凡友. 1999. 会理—东川元古代海相火山岩带的特征与形成环境. 矿物岩石, 19(2): 17~24.

赵银胜, 李金华. 1987. 鄂北打鼓石群的微古植物群及其地层划分与对比. 湖北地质, 1(1): 11~27.

浙江省地质矿产局. 1989. 浙江省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1~688.

周传明. 2016. 扬子区新元古代前震旦纪地层对比. 地层学杂志, 40(2): 120~135.

周家云, 毛景文, 刘飞燕, 谭洪旗, 沈冰, 朱志敏, 陈家彪, 罗丽萍, 周雄, 王越. 2011. 扬子地台西缘河口群钠长岩锆石 SHRIMP 年龄及岩石地球化学特征. 矿物岩石, 31(3): 66~73.

朱炳泉, 常向阳, 邱华宁, 王江海, 邓尚贤. 2001. 云南前寒武纪基底形成与变质时代及其成矿作用年代学研究. 前寒武纪研究进展, 24(2): 75~82.

朱华平, 周邦国, 王生伟, 罗茂金, 廖震文, 郭阳. 2011a. 扬子地台西缘康滇克拉通中碎屑锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. 矿物岩石, 31(1): 70~74.

朱华平, 范文玉, 周邦国, 王生伟, 罗茂金, 廖震文, 郭阳. 2011b. 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. 高校地质学报, 17(3): 452~461.

Subdivision and Correlation of the Mesoproterozoic Stratigraphy in the Western and Northern Margins of Yangtze Block

GENG Yuansheng, KUANG Hongwei, LIU Yongqing, DU Lilin

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract

The Mesoproterozoic strata, distributed in the western and northern margin of Yangtze block, have experienced strong deformation and lower to upper greenschist-facies metamorphism. Based on previous study and formation ages, Mesoproterozoic can be divided into two stages: the Early Mesoproterozoic (1.8 ~ 1.4Ga) and Late Mesoproterozoic (1.4 ~ 1.0Ga). The Early Mesoproterozoic strata (1.8 ~ 1.4Ga) contains Dahongshan Group, Dongchuan Group, Hekou Group and Tong'an Formation (1~4 Member), while the Late Mesoproterozoic (1.4~1.0Ga) is composed mainly of Kunyang Group, Huili Group in the southwestern part of the block, and Shennongjia Group and Dagushi Group in the northern part of the block in the Late Mesoproterozoic. New zircon U-Pb geochronology data indicate that the tuff of the Tong'an Formation and the quartz-keratophyrite of the Hekou Group formed at $1744 \pm 14\text{Ma}$ and $1659 \pm 23\text{Ma}$, respectively, and the mafic dyke intruded into the Huili Group at $1026 \pm 7\text{Ma}$. According to the sedimentary succession, formation environment and geochronological data, the Dahongshan Group, Dongchuan Group, Hekou Group and Tong'an Formation formed at almost same time and have similar compositions. They all are related to IOCG (Iron-Oxide-Copper-Gold) or SSC (Sediment-hosted Stratiform Copper) formed in an extensional environment during 1.75~1.45Ga. The Huodiya Group in the northern margin of the Yangtze Block may belong to the Early Mesoproterozoic. Late Mesoproterozoic strata are also present in the western and northern margin of the Yangtze Block, including Kunyang and Huili groups in the southwestern margin of Yangtze Block were formed in 1.2 ~ 1.0 Ga; Shennongjia and Dagushi groups in the northern margin of the block formed during 1.4 ~ 1.0Ga, with the top of them probably extending to the Early Neoproterozoic. A large amount of stromatolite was also found to occur in the Mesoproterozoic strata, indicating that they formed in a warm, humid shallow sea environment. Besides the Mesoproterozoic strata mentioned above, the Julin Group in the Yuanmou area of Yunnan province, and the Dengxiangying Group and fifth Member of the Tong'an Formation in western Sichuan province all belong to the Late Mesoproterozoic.

Key words: Early Mesoproterozoic; Late Mesoproterozoic; stratigraphy subdivision and correlation; zircon geochronology; western and northern margins of Yangtze Block