

doi: 10.12029/gc20160312

纪星星, 周诗, 陈棋, 等. 滇中地区昆阳群物源及构造环境[J]. 中国地质, 2016, 43(3): 857-878.

Ji Xingxing, Zhou Shi, Chen Qi, et al. Provenance and tectonic setting of the Kunyang Group in central Yunnan Province[J]. Geology in China, 2016, 43(3): 857-878(in Chinese with English abstract).

滇中地区昆阳群物源及构造环境

纪星星^{1,2,3} 周 诗² 陈 棋² 刘德民² 李德威^{2,4}

(1. 贵州省工程防震研究院, 贵州 贵阳 550001; 2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北 武汉 430074;
3. 贵州省地震局, 贵州 贵阳 550001; 4. 中国地质大学地质调查研究院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 昆阳群的形成时代、沉积环境、源岩性质等一直存在较大争议, 为了查明滇中地区昆阳群的物源及其形成的构造环境, 文章在分析昆阳群沉积组合和沉积相的基础上, 对昆阳群 3 件变质砂岩样品中的碎屑锆石进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定, 对昆阳群 20 件极低级变质碎屑岩进行地球化学分析。从昆阳群黄草岭组、黑山头组和美党组中分别获得了最年轻的谐和年龄为 984.0 Ma、945.0 Ma 和 954.0 Ma; 碎屑锆石年龄峰谱显示, 在 1.0 Ga、1.35 Ga、1.73 Ga 和 2.44 Ga 出现了统计峰值, 其年龄主要集中在 1.73 Ga 和 1.35 Ga。表明昆阳群源区主要经历了 1.0 Ga、1.35 Ga、1.73 Ga 和 2.44 Ga 的构造热事件, 资料显示扬子地块西南缘出露的大红山群形成时代为 1.7 Ga, 格林威尔期的构造热事件时期为 1.0~1.3 Ga。此外, 地球化学分析结果表明昆阳群源岩主要是形成于大陆岛弧—活动大陆边缘的石英质旋回沉积、长英质岩石和少量镁铁质岩石。在中元古代晚期—新元古代早期(0.95~1.0 Ga), Rodinia 超大陆形成阶段, 在扬子地块西南缘的弧后前陆盆地中形成昆阳群的沉积组合, 物源主要来自扬子地块西南缘的大红山群和格林威尔期岛弧的岩石。

关键词: 昆阳群; 碎屑锆石; 地球化学; 物源; 构造环境

中图分类号: P545; P588.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2016)03-0857-22

Provenance and tectonic setting of the Kunyang Group in central Yunnan Province

Ji Xing-xing^{1,2,3}, Zhou Shi², Chen Qi², Liu De-min², Li De-wei^{2,4}

(1. School of Earthquake Engineering of Guizhou Province, Guiyang 550001, Guizhou, China; 2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Earthquake Administration of Guizhou Province, Guiyang 550001, Guizhou, China; 4. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Formation age, sedimentary environment and source rock characteristics of the Kunyang Group are problems of considerable controversy. In order to identify the provenance and tectonic setting of the Kunyang Group in central Yunnan, the

收稿日期: 2016-01-14; 改回日期: 2016-04-14

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011220400)资助。

作者简介: 纪星星, 男, 1989 年生, 硕士, 构造地质学; E-mail: jixingxing89@sina.com。

通讯作者: 李德威, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 从事地球系统动力学、地热能理论与应用; E-mail: dewei89@sina.com。

authors analyzed the sedimentary assemblage and sedimentary facies of the Kunyang Group, and conducted LA-ICP-MS detrital zircon U-Pb dating of 3 metamorphic sandstone samples from the Kunyang Group, which yielded different youngest concordant ages for Huangcaoling Formation, Heishantou Formation and Meidang Formation, being 984.0 Ma, 945.0 Ma and 954.0 Ma respectively. Age spectrum of these detrital zircons reveals a wide age range from Archean to Neoproterozoic with prominent peak at ~1.0 Ga, ~1.35 Ga and ~1.73 Ga and the second peak at ~2.44 Ga, mainly concentrated on ~1.35 Ga and ~1.73 Ga. It is inferred that the Kunyang Group source area mainly experienced 1, 1.35 and 1.73–2.44 Ga tectonic thermal events, and the age of the Dahongshan Group in southwest Yangtze Block is about 1.7Ga. The period of tectonic thermal event in Grenvillian is from 1.0 Ga to 1.3Ga. The authors also analyzed the geochemical characteristics of 20 extremely low-grade metamorphic rocks from Kunyang Group. The result shows that source rocks of Kunyang Group are quartzose cyclic sediments, felsic rocks and some mafic rocks formed in active continental margin or continental island arc. It is concluded that, from late Mesoproterozoic to early Neoproterozoic (0.95–1.0 Ga), the Kunyang Group was formed in the foreland basin with its provenance mainly from the Dahongshan Group in southwestern Yangtze block and Grenville-aged island arc.

Key Words: Kunyang Group; Detrital zircon; geochemistry; provenance; tectonic environment

About the first author: JI Xing-xing, male, born in 1989, master, majors in structural geology; E-mail: jixingxing89@sina.com.

About the corresponding author: LI De-wei, male, born in 1962, doctor, majors in dynamics of the earth system, theory and application of geothermal energy; E-mail: dewei89@sina.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Project (No. 1212011220400).

1 前 言

昆阳群最早是朱庭祐先生于1926年提出的概念,系指分布于四川会理、会东、滇中地区的一套经历低级—极低级变质作用的碎屑岩—碳酸盐岩组合,后人在研究昆阳群时,以皎平—铜厂—杨武断裂为界,将昆阳群划分为两部分,断裂东侧自下而上依次出露黄草岭组、黑山头组、大龙口组和美党组;断裂以西自下而上依次出露因民组、落雪组、黑山组(鹅头厂组)、青龙山组,对于这2套地层的新老关系,素来存在“倒八组”、“正八组”之争,“正八组”认为黄草岭组—美党组在底,因民组—青龙山组在顶,“倒八组”持相反的观点^[1-5]。

近年来随着 Pb-Pb、Rb-Sr、U-Pb、K-Ar 和 Ar-Ar 等测年手段的广泛应用,获得了大量的关于昆阳群的年龄数据。张传恒等首次发表了对黑山头组之上富良棚段出露的凝灰岩夹层进行锆石微区 U-Pb 同位素分析,获得了(1032.0±9.0) Ma 的形成年龄,成为该地区的首次“颠覆性”成果,彻底结束了“正八组”和“倒八组”的地层层序之争,首次以精确的同位素定年确定了李氏等“倒八组”排序的正确性^[6];其后其他地质专家又在富良棚组凝灰岩中获得了(1043.0±7.0) Ma、(1031.0±12.0) Ma、(1047.0±15.0) Ma 的形成年龄^[7-8]。高林志等采集了

云南晋宁地区美党组之上柳坝塘组中的凝灰岩,对其进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析,获得了(890.0±9.0) Ma 和(834.0±34.0) Ma 的年龄。进一步限定了黄草岭组—美党组的形成时代^[10]。对黑山组顶部出露的凝灰岩夹层进行锆石微区 U-Pb 同位素分析,获得(1503.0±17.0) Ma、(1504.0±4.0) Ma、(1500.0±4.0) Ma 的形成年龄^[8,9]。可以看出,黄草岭组—美党组形成于 1.0 Ga 左右,因民组—绿汁江组形成于 1.5 Ga 左右,两者相差近 500.0 Ma。2009 年底,中国地层委员会在云南东川和易门地区召开了 1 次野外现场会,会后“纪要”建议将东川地区的昆阳群(下亚群)恢复最初的命名东川群,自下而上包括因民组、落雪组、黑山组和青龙山组;将昆阳群中亚群保留为昆阳群,自下而上包括黄草岭组、黑山头组、富良棚组(新增)、大龙口组和美党组;至此,前人对昆阳群的划分有了确切的结论,即黄草岭组、黑山头组、富良棚组、大龙口组、美党组划归昆阳群,因民组、落雪组、黑山组、青龙山组划归东川群^[11]。

前人对于昆阳群形成时的盆地类型的认识存在争议,龚琳认为昆阳群是一套海相大陆边缘沉积组合,形成于元古宙的古大陆边缘裂谷^[12];华仁民认为昆阳群的构造环境是古大陆裂谷—拗拉谷环境^[13];牟传龙等对四川会理—会东地区进行岩相古地理及沉积相分析,依据“正八组”的划分方案,认

为昆阳群的沉积盆地属于裂陷槽或夭折裂谷^[14, 15];杜永生等认为滇中地区昆阳群为补偿性裂谷盆地沉积^[16];也有学者认为昆阳群为前陆盆地环境沉积组合^[6, 8, 17]。前人关于昆阳群形成的盆地类型的讨论是基于“正八组”或“倒八组”,近年来的研究发现,昆阳群特指形成于格林威尔造山期(约1.0 Ga)的经历低级—极低级变质作用的碎屑岩—碳酸盐岩夹火山岩组合,自下而上包括:黄草岭组、黑山头组、富良棚组、大龙口组和美党组。关于昆阳群的沉积环境和盆地类型,有待进一步探讨。

前人对昆阳群进行了碎屑锆石分析,认为昆阳群形成时代为中元古代晚期—新元古代早期^[5, 8, 18],黑山头组碎屑锆石年龄区间为1.0~2.7 Ga,存在4个峰值:1.16 Ga、1.45 Ga、1.58 Ga、1.73 Ga,主峰值为1.58 Ga,黄草岭组、黑山头组、富良棚组、大龙口组、美党组的物源来自华夏地块。对易门地区黑山头组碎屑岩进行了碎屑锆石的分析及测试,2件样品分别获得:1697.0~1901.0 Ma的主峰值,1492.0~1634.0 Ma、1188.0~1195.0 Ma、2318.0~2429.0 Ma的次峰值;1699.0~1947.0 Ma的主峰值,1376.0~1465.0 Ma、1050.0 Ma、2446.0 Ma的次峰值;根据黑山头组中获得的4颗957.0~997.0 Ma最年轻锆石,限定了黑山头组的沉积上限^[18]。对云南保和镇出露的黑山头组的碎屑岩进行了碎屑锆石年代学测试,获得了1.75 Ga的主峰值和1.05 Ga、1.25 Ga、1.35 Ga的次峰值^[19]。前人认为昆阳群是格林威尔期,扬子地块与华夏地块拼合造山时形成的,物源主要来自华夏地块^[8, 17]。然而近年来,高林志等采集了江南造山带四堡群、下江群、冷家溪群、板溪群、梵净山群、双桥山群及双溪坞群等地层中凝灰岩锆石,并进行了大量的SHRIMP锆石U-Pb分析,证明江南造山带形成于晋宁运动时期(约820.0 Ma)^[10]。分布于扬子地块西南缘的昆阳群形成时代在1.0 Ga左右。该时期扬子地块与华夏地块尚未拼合,因此前人关于昆阳群物源来自华夏地块的观点,值得进一步探讨。且前人并未对昆阳群进行碎屑岩全岩分析,以探讨昆阳群的源岩性质。

本文对昆阳群的沉积岩组合、沉积相进行分析;对昆阳群的变质碎屑岩进行全岩地球化学分析;并选取了美党组、黑山头组和黄草岭组的变质砂岩样品进行了碎屑锆石U-Pb年代学分析。来探

讨昆阳群的物源及沉积背景;并进一步限定昆阳群的形成时代。

2 地质背景

研究区位于云南滇中地区,区域上处于扬子地块、华夏地块和三江造山带的结合部位(图1-a),滇中地区出露的经历低级—极低级变质作用的碎屑岩—碳酸盐岩夹火山岩组合,以皎平—铜厂—杨武断裂为界分为东西两部分,东部为昆阳群,西部为东川群。昆阳群呈NS展布在扬子地块西南缘(图1-b)。本文采集的样品位于云南建水地区,研究区内昆阳群自下而上可以分为黄草岭组、黑山头组、富良棚组、大龙口组和美党组,昆阳群主要呈断块产出(图1-c)。昆阳群中构造变形较为发育,野外地质调查中,可见大量的断层和褶皱发育,美党组中可见多期断层发育(图2-a);大龙口组中可见不协调褶皱发育(图2-c);黑山头组中可见大量的紧闭褶皱发育(图2-e);黄草岭组位于底部,变形最强,可见膝折构造发育(图2-g)。岩性组合上,黄草岭组根据岩性组合可以分为2段,1段为各种色调板岩;2段为各种颜色的粉砂质绢云母板岩、粉砂质板岩组成,夹有少量的变质石英粉砂岩,沉积组合上可见粉砂质板岩与泥质板岩组成的韵律层发育(图2-h)。黑山头组主要由灰色薄层板岩、粉砂质绢云母板岩夹薄—中层状石英粉砂岩、细砂岩及中—厚层块状石英岩、石英砂岩组成,自下而上变质石英砂岩、石英岩、粉砂岩、板岩构成1个沉积旋回,黑山头组主要由6~7个该类型的正向沉积旋回层组成,与黄草岭组为整合接触,可见变质粉砂岩中发育变余水平层理(图2-f)。富良棚组浅—深灰色薄层状凝灰岩、泥灰岩、白云质灰岩构成基本层序,与黑山头组为整合接触。大龙口组根据岩性组合可以分为5段,1段为微晶(粉晶)灰岩、微晶白云质灰岩;2段为粉晶—微晶—泥晶灰岩;3段为微晶灰岩、钙质灰岩夹钙质板岩;4段下部为大蠕条灰岩、粉晶灰岩、钙质(泥质)板岩,中部为藻屑灰岩、粉晶灰岩、蠕虫灰岩、少量钙质板岩,上部为叠层石微晶灰岩、泥灰岩;5段为条带状灰岩、泥灰岩、粉砂岩,与富良棚组为整合接触,大龙口组中碳酸盐岩中层理发育较好(图2-d)。美党组根据岩性可以分为2段:1段为粉砂质板岩、泥质板岩、钙质板岩;2段为变质石英砂

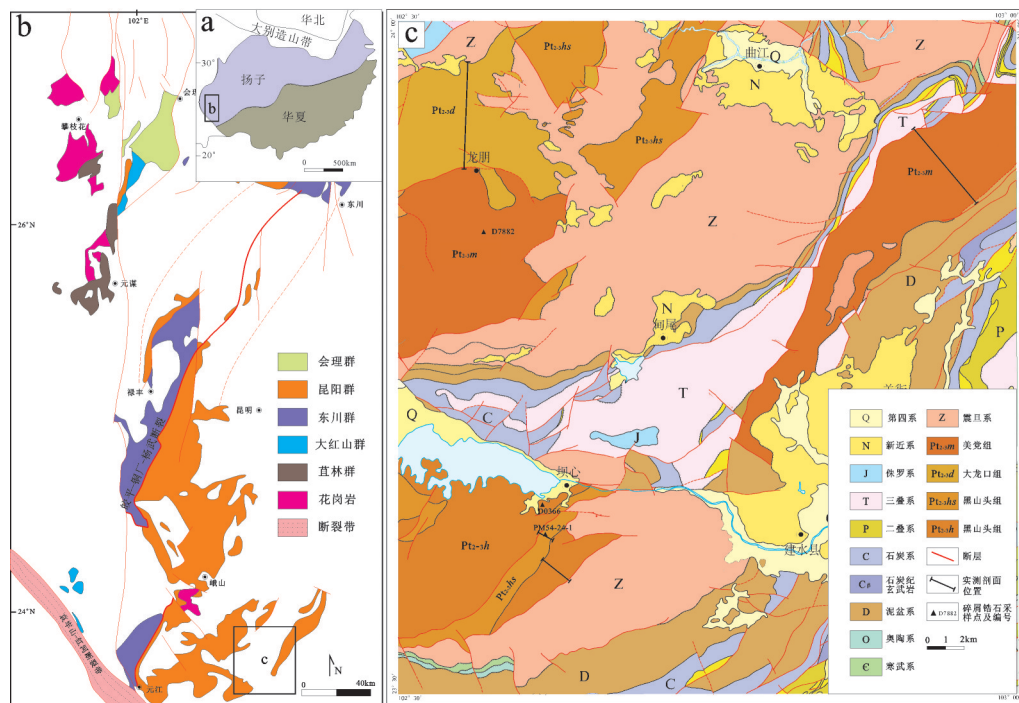


图1 云南建水地质简图

a—华南构造分区简图; b—扬子西南缘前寒武地层划分图; c—研究区地质简图及采样点、剖面位置

Fig. 1 Geological sketch map of Yunnan Province

a—Simplified tectonic divisions of South China; b—Divisions of Precambrian strata on the southwestern margin of the Yangtze; c—Geological map of the study area. Sampling profiles and Locations are marked

岩、变质粉砂岩、泥质(粉砂质)板岩,与大龙口组为整合接触,美党组2段中可见变质粉砂岩与粉砂质板岩互层发育,构成1个沉积旋回(图2-b)。

3 昆阳群岩石学特征及沉积环境

昆阳群变质粉砂岩的矿物成分以岩屑和石英为主,碎屑为棱角一次棱角状,分选较差;变质石英砂岩中矿物成分主要以石英颗粒为主,并有少量岩屑发育,碎屑为次棱角状,分选中等。整体上,可以看出昆阳群碎屑岩磨圆一般一较差,分选中等一较差(图3),指示了昆阳群近源沉积的特征。

根据野外剖面实测、室内分析及前人研究资料,绘制了昆阳群剖面柱状图(图4)。图中可以看出,昆阳群中黄草岭组主要由各种色调的板岩组成,中上部发育少量泥质粉砂岩,板岩中发育由粉砂和泥质物质组成的韵律层理、水平层理、波纹状纹层,指示其形成于浪基面之下,深而平静的水域,属于远离海岸线的陆棚滨外带沉积。黑山头组中可见6~7个沉积旋回发育,每个旋回均呈现下部为变(中粗粒)石英砂岩,向

上逐渐过渡为薄层状变石英砂岩、变粉砂岩、粉砂质板岩、板岩,变质砂岩中水平层理、底部冲刷面发育,见中一大型交错层理,为较强水动力条件下的产物,属于海岸相近滨带沿岸砂坝沉积;变质细、粉砂岩和板岩中水平层理、正粒序层理、小型冲刷面、沙纹层理构造发育,属于浪基面附近的滨外带沉积。这2类岩性构成的多旋回岩系反映了海岸近滨—滨外带反复交替变化的沉积环境。富良棚组为浅—深灰色薄层状凝灰岩、泥灰岩、白云质灰岩构成基本层序,灰岩与凝灰岩的基本层序反映了远源火山间歇性喷发的特点,属于浅海陆棚沉积。大龙口组中部发育藻屑灰岩、蠕虫灰岩,上下发育灰岩夹板岩,显示从碳酸盐台地环境—潮坪环境—陆棚边缘盆地。美党组下部发育钙质板岩,上部发育细碎屑岩,为一套滨—浅海陆棚环境沉积。整体上昆阳群经历海退和海进2个沉积阶段。

4 分析方法

全岩主微量元素分析在湖北省地质实验研究



图2 昆阳群野外照片

a—美党组多期活动的断层; b—美党组沉积韵律旋回; c—大龙口组不协调褶皱; d—大龙口组层理; e—黑山头组紧闭褶皱; f—黑山头组平行层理; g—黄草岭组膝折构造; h—黄草岭组沉积韵律旋回

Fig.2 Field photos of Kunyang Group

a—Multi-stage faults of Meidang Formation; b—Sedimentary rhythm cycle of Meidang Formation; c—Disharmonic folds of Dalongkou Formation; d—Beddings of Dalongkou Formation; e—Tight folds of Heishantou Formation; f—Parallel bedding of Heishantou Formation; g—Kink structure of Huangcailing Formation; h—Sedimentary rhythm cycle of Huangcailing Formation

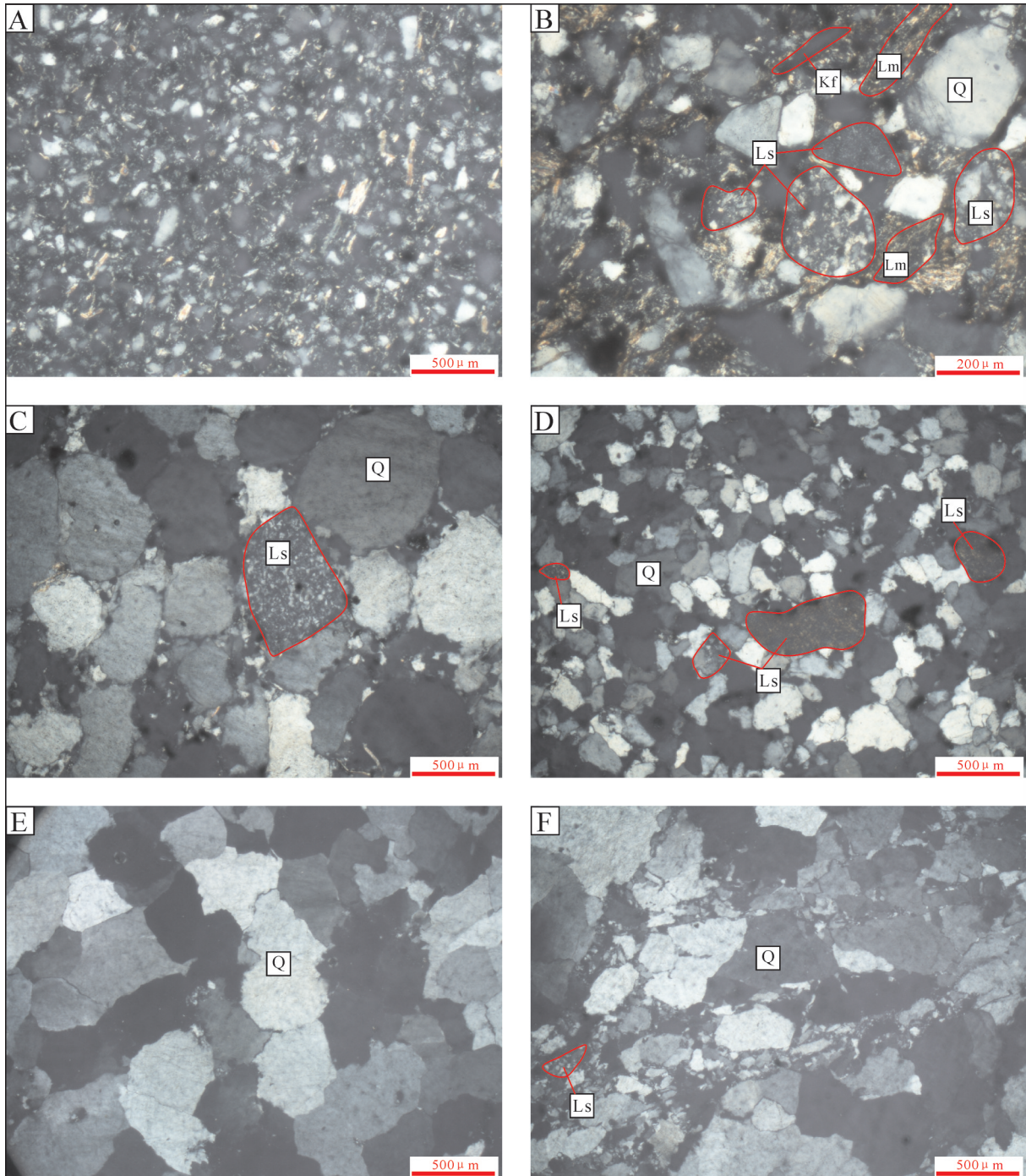


图3 昆阳群碎屑岩镜下特征

Q—石英碎屑, Ls—沉积岩岩屑, Lm—变质岩岩屑, Kf—钾长石碎屑

Fig. 3 Photomicrograph characteristics of the Kunyang Group

Q—Quartz grains; Ls—Sandstone fragment; Lm—Metamorphic rock fragment; Kf—Potash feldspar fragment

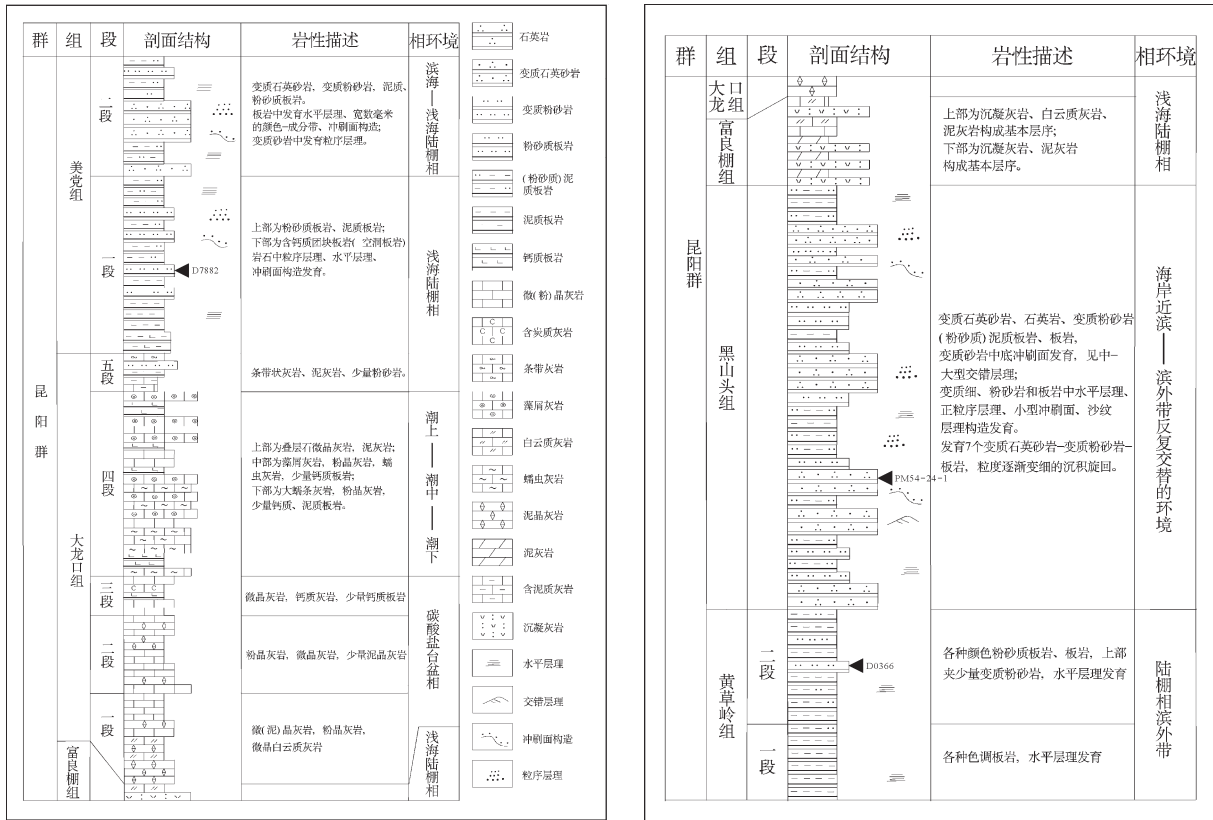


图4 昆阳群剖面结构、岩性、沉积环境^{①-⑤}

Fig.4 Sectional structure, lithology, sedimentary environment of Kunyang Group^{①-⑤}

Based on the geological, maps and reports (1: 50000) of the Longpeng Sheet, the Luoshuidong Sheet, the Shiping Sheet, the Baxin Sheet, the Wadiejie Sheet

所元素与同位素地球化学研究室完成。首先去掉样品的表层,防止污染对分析结果的影响。将样品粉碎至200目以下,利用X射线荧光光谱仪(XRF)和电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)分别对主量元素和微量元素进行测试分析。主量元素分析采用X射线荧光光谱分析法(XRF),分析误差<1%;微量元素分析采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)分析,分析精度优于5%~10%。

锆石LA-ICP-MS(U-Pb)微区分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。其中激光剥蚀系统为德国MicroLas公司的GeoLas 200M(准分子激光器,193nm ArF Excimer),

等离子体质谱为Agilent公司7500a ICP-MS。对原始数据,采用软件ICPMSDataCal处理(包括对样品及空白信号的选择、微量元素、U-Th-Pb同位素比值和年龄计算),得到数据后采用ISOPLOT程序进行谐和图、平率直方图的绘制。U-Pb同位素定年中采用锆石标准91500作为同位素分馏校正,每5个样品点分析2次91500。

5 分析结果

5.1 碎屑锆石年代学

本文分别对采自昆阳群美党组的粉砂岩样品(D7882)、黑山头组的中粒石英砂岩样品(PM54-24-

① 云南省地质矿产局. 石屏幅地质图及地质报告[R]. 1985.
 ② 云南省地质矿产局. 洼垭街幅地质图及地质报告[R]. 1991.
 ③ 云南省地质矿产局. 落水洞幅地质图及地质报告[R]. 1991.
 ④ 中国地质大学(武汉). 龙朋幅地质图及地质报告[R]. 2015.
 ⑤ 中国地质大学(武汉). 坝心幅地质图及地质报告[R]. 2015.

1)和黄草岭组的细砂岩(D0366)进行了碎屑锆石分析工作。由于>1.0 Ga的古老锆石均存在一定程度的Pb丢失,在相同的地质条件下, ^{207}Pb 与 ^{206}Pb 具有相同的变化趋势,其比值稳定, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄可以很好地反映古老岩石的成岩年龄,本文对于>1.0 Ga的锆石颗粒,选取 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 作为锆石形成(或变质)年龄,对于<1.0 Ga的锆石颗粒,选取 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄作为其形成(或变质)年龄。具体数据年龄见表4。

美党组样品(D7882)中的碎屑锆石颗粒较小,锆石阴极发光图像显示多数锆石发育环带结构,少量锆石内部较为均一(图5-a)。碎屑锆石的Th/U比值在0.14~1.3,主体为0.41~0.8。对其中60粒锆石进行了微区分析,共获得51个谐和度大于90%的数据,美党组中碎屑锆石年龄范围分布于0.95~3.3 Ga,主要存在3个主峰值1810.0 Ma、1720.0 Ma和1200.0 Ma;和2个次峰值2280.0 Ma和2460.0 Ma

(图6)。

黑山头组样品(PM54-24-1)中的锆石颗粒主要为无色—浅红色,由于砂岩颗粒较粗,分选出来的锆石颗粒较大、磨圆一般。黑山头组中锆石的阴极发光图像显示锆石内部结构类型包括3种类型:①具明显振荡环带的单颗粒;②内部结构均一的单颗粒以及被少量均一部分切割的振荡环带;③具有核—幔—边结构的颗粒(图5-b)。碎屑锆石的Th/U比值在0.17~1.26,主体位于0.38~0.84。对其中90粒碎屑锆石进行了微区分析,共获得88个谐和度大于90%的数据,黑山头组中碎屑锆石年龄范围分布于0.95~2.4 Ga,主要存在2个主峰值1730.0 Ma和1330.0 Ma;2个次峰值1080.0 Ma和2300.0 Ma(图6)。

黄草岭组样品(D0366)中的锆石阴极发光图像(图5-c)揭示出2种内部结构:①整体上发育良好的岩浆振荡环带;②无明显内部结构,推测为重结

表1 昆阳群碎屑岩主量元素(%)分析结果

Table 1 Major element compositions (%) of the clastic rocks from Kunyang Group

分组	样品号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	TFeO	H ₂ O+	CO ₂	Lost	CIA
美党组	YP21-133-1	0.17	0.29	7.21	85.29	0.12	1.55	0.03	0.81	0.002	1.66	1.74	0.10	1.90	79.50
	YP21-266-1	0.07	0.90	16.38	65.95	0.13	4.03	0.03	0.86	0.11	4.15	4.28	0.04	4.35	78.60
	YP21-73-1	0.13	0.75	15.42	68.10	0.12	4.10	0.03	0.85	0.09	4.21	3.76	0.12	3.93	77.00
	YP21-150-1	0.29	0.33	8.88	74.55	0.20	2.02	0.04	0.71	0.96	2.20	3.01	0.04	3.07	78.20
	YP21-293-1	0.15	1.10	16.62	66.11	0.14	4.18	0.03	0.84	0.05	4.31	4.14	0.08	4.34	78.00
	YP21-257-1	0.07	0.37	9.04	81.80	0.09	1.88	0.03	0.59	0.02	1.96	2.64	0.08	3.11	81.00
大龙口组	YP20-171-1	0.27	0.83	23.44	57.56	0.11	6.48	0.04	1.04	0.05	6.58	4.41	0.04	4.44	76.20
	YP20-282-1	0.14	0.77	20.07	61.48	0.07	5.79	0.03	1.33	0.12	5.85	3.99	0.04	4.01	75.70
	YP20-268-1	0.10	0.54	16.48	66.70	0.09	4.18	0.03	0.98	0.01	4.26	3.67	0.04	3.70	78.00
	YP20-229-1	0.16	0.81	17.80	67.90	0.07	5.36	0.02	1.11	0.003	5.42	3.08	0.04	3.13	75.90
黑山头组	PM70-107-1	0.02	0.07	1.26	95.60	0.05	0.10	0.03	0.08	0.01	0.14	0.80	0.02	0.90	89.60
	PM54-24-1	0.02	0.09	0.63	96.78	0.03	0.16	0.02	0.03	0.02	0.19	0.54	0.02	0.58	75.70
	PM57-4-1	0.06	1.04	11.00	75.69	0.09	2.50	0.03	0.62	0.05	2.58	3.28	0.04	3.25	79.80
	PM57-1-1	0.07	1.22	19.32	60.84	0.09	4.80	0.03	0.86	0.03	4.88	4.93	0.02	4.93	78.50
	PM57-22-1	1.09	1.91	16.33	65.22	0.10	3.93	0.13	0.87	0.05	4.02	3.68	0.02	3.62	75.40
黄草岭组	D4414-1	0.05	0.91	17.46	60.56	0.08	3.57	0.05	0.74	0.01	3.65	5.36	0.02	5.36	81.50
	D4454-1	0.07	0.81	18.61	64.70	0.03	4.13	0.03	0.99	0.01	4.16	4.80	0.02	4.79	80.30
	D4451-1	0.07	0.75	18.52	64.07	0.07	3.80	0.03	0.90	0.005	3.86	5.17	0.02	5.16	81.50
	D4447-1	0.10	0.79	19.53	61.07	0.03	4.68	0.04	0.98	0.004	4.70	5.08	0.02	5.05	79.00
	D4411-1	0.04	0.27	7.30	85.43	0.03	1.16	0.05	0.41	0.004	1.18	2.31	0.02	2.32	84.50

注: TFeO代表全铁, TFeO=FeO+0.8998×Fe₂O₃。

表2 昆阳群碎屑岩微量元素(10^{-6})分析结果Table 2 Trace element compositions (10^{-6}) of the clastic rocks from Kunyang Group

分组	样品号	Pb	U	Co	Ba	Rb	Th	Ta	Nb	Sr	Zr	Hf	Sc	Cr	V	Co	Zn
美党组	YP21-133-1	58.97	2.59	1.14	271.9	68.91	12.11	1.03	9.45	42.19	312.7	9.44	9.89	52.04	76.99	1.14	20.38
	YP21-266-1	25.38	3.05	8.01	477.7	177.5	16.77	1.93	16.37	12.90	220.4	6.71	16.91	93.94	138.7	8.01	80.29
	YP21-73-1	24.86	3.17	12.76	506.3	189.5	17.65	1.76	17.78	28.51	280.0	8.32	17.06	87.97	128.9	12.76	115.8
	YP21-150-1	35.05	2.39	67.73	334.7	88.86	10.79	1.26	10.11	49.47	226.7	7.18	12.24	58.96	85.01	67.73	72.90
	YP21-293-1	25.15	3.01	10.06	512.9	179.0	15.88	1.68	17.23	29.91	231.5	7.08	17.69	92.62	139.9	10.06	286.2
	YP21-257-1	12.96	2.01	4.49	274.3	86.67	10.74	1.13	10.31	27.75	227.6	6.76	9.03	37.49	83.72	4.49	44.34
大龙口组	YP20-171-1	4.79	2.91	17.21	444.4	300.4	25.38	2.98	23.33	30.65	178.8	5.44	23.53	87.49	113.8	17.21	104.2
	YP20-282-1	3.31	3.52	10.03	1449	276.2	20.34	2.86	27.68	20.95	270.8	7.62	28.97	156.2	143.8	10.03	33.28
	YP20-268-1	6.20	3.25	6.54	604.8	182.5	17.95	2.81	18.19	17.09	251.9	7.49	19.91	94.87	129.9	6.54	36.01
	YP20-229-1	15.61	3.01	1.89	1033	222.1	20.07	2.54	20.75	34.69	319.3	9.88	18.92	87.96	143.4	1.89	20.98
黑山头组	PM70-107-1	5.26	0.45	0.91	52.58	6.13	1.85	0.11	1.40	8.12	39.10	1.28	1.50	15.00	10.82	0.91	5.25
	PM54-24-1	3.54	0.89	0.46	396.9	8.06	2.49	0.05	0.79	6.26	35.00	1.25	1.49	2.01	9.57	0.46	13.80
	PM57-4-1	11.74	3.13	10.80	392.8	120.9	15.24	1.22	9.64	10.39	253.7	7.51	11.54	81.16	76.94	10.80	53.83
	PM57-1-1	12.29	3.56	11.44	1023	204.0	19.18	2.31	17.95	14.96	160.8	4.98	23.49	113.4	154.7	11.44	51.32
	PM57-22-1	19.46	3.57	10.24	453.2	207.1	20.62	1.95	15.40	29.70	202.2	6.33	21.22	100.4	117.8	10.24	102.4
黄草岭组	D4414--1	9.89	3.51	5.68	389.6	177.0	17.73	1.77	13.84	31.11	158.9	4.79	23.32	121.6	131.3	5.68	83.62
	D4454-1	7.58	3.12	5.46	479.9	199.6	19.05	2.03	23.18	18.74	189.1	5.72	22.70	109.0	149.9	5.46	32.75
	D4451-1	12.70	2.99	1.87	477.2	149.3	15.18	2.12	17.20	29.75	187.4	5.86	20.56	109.5	125.1	1.87	35.17
	D4447-1	12.36	3.44	3.27	511.9	211.7	15.83	2.55	19.95	15.44	180.2	5.60	24.54	127.8	159.8	3.27	43.45
	D4411-1	11.25	2.12	1.58	161.6	62.16	10.76	0.85	7.72	11.65	301.2	9.29	6.06	22.21	38.52	1.58	13.37

晶或变质成因。碎屑锆石 Th/U 比值在 0.24~2.22, 主体为 0.4~1.0。对其中 90 粒碎屑锆石进行了微区分析, 共获得了 83 个谐和度大于 90% 的数据, 黄草岭组中碎屑锆石年龄范围分布于 0.98~2.99 Ga, 主要存在 2 个主峰值 1750.0 Ma 和 1370.0 Ma; 2 个次峰值 1040.0 Ma 和 2480.0 Ma(图 6)。

整体上, 可以看出采自昆阳群中的碎屑沉积岩的碎屑锆石年龄区间为 0.95~3.3 Ga, 主要在 1.75 Ga、1.4 Ga 和 1.0 Ga 出现强烈的峰值, 并在 2.5 Ga 和 3.0 Ga 出现次峰值, 表明昆阳群物源主要为中元古代地壳物质, 并有少量古元古代和太古宙地壳物质的加入。碎屑沉积物中的碎屑锆石在没有“污染”和 U-Pb 体系扰动的前提下, 最年轻的锆石可以用来限定地层的最大沉积年限。通过对昆阳群中美党组、黑山头组和黄草岭组中碎屑锆石进行年龄分析, 分别获得了(954.0±13.6) Ma、(945.0±11.4) Ma 和 (984.0±13.7) Ma, 表明昆阳群的沉积年龄应小于

0.95 Ga。

5.2 地球化学特征

本文对昆阳群共采集了 20 件样品(6 件采自美党组、4 件采自大龙口组、黑山头组和黄草岭组中各采集 5 件)用于全岩地球化学分析。

主量分析结果(表 1)显示, 昆阳群碎屑沉积岩主量元素组成差异较大, 采自黑山头组中的石英砂岩具较高的 SiO₂ 含量(大于 95%), 其他细碎屑岩 SiO₂ 含量为 57.56%~85.29%, 平均值为 68.5%, Al₂O₃ 含量 7.21%~23.44% 中等—偏高, 平均值为 15.52%, (FeO_T + MgO) 含量中等, 变化范围较大, 为 1.45%~7.41%, 平均含量为 4.67%; TiO₂ 含量 0.41%~1.33%, 平均含量 0.86%。在各主量元素氧化物与 SiO₂ 的相关性图中, 昆阳群碎屑岩的主量元素 Al₂O₃、FeO_T、MgO、TiO₂ 均显示了与 SiO₂ 负相关关系(图 7), 反映随着碎屑岩成熟度的增加, 不稳定组分(岩屑和长石)的含量逐渐减少^[20, 21]。在 Fe₂O₃/K₂O-SiO₂/Al₂O₃

表3 昆阳群碎屑岩稀土元素(10^{-6})分析结果Table 3 Rare element compositions (10^{-6}) of the clastic rocks from Kunyang Group

分组	样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	总和
美党组	YP21-133-1	48.19	97.46	11.95	46.24	9.06	1.50	6.64	1.02	5.37	1.05	2.80	0.42	2.78	0.38	27.30	262.15
	YP21-266-1	39.49	65.82	10.20	39.43	8.23	1.65	7.55	1.29	7.01	1.42	3.93	0.62	4.21	0.63	37.86	229.32
	YP21-73-1	48.50	93.98	11.95	44.72	9.02	1.68	8.26	1.36	7.43	1.48	4.27	0.65	4.41	0.65	40.29	278.64
	YP21-150-1	40.54	77.13	9.74	36.46	7.04	1.22	5.80	0.94	5.15	1.03	2.80	0.44	2.91	0.43	26.07	217.71
	YP21-293-1	44.96	88.96	11.57	44.61	9.57	1.86	8.31	1.34	7.54	1.50	4.12	0.63	4.40	0.65	36.53	266.56
	YP21-257-1	41.80	80.52	9.93	36.89	6.33	1.13	5.02	0.81	4.45	0.85	2.44	0.37	2.67	0.39	22.89	216.49
大龙口组	YP20-171-1	72.58	91.94	16.35	63.08	12.48	2.57	15.43	2.63	15.39	3.31	9.26	1.38	8.94	1.31	91.25	407.90
	YP20-282-1	46.17	102.4	12.43	45.28	7.77	1.40	5.80	0.91	4.95	1.04	2.89	0.49	3.36	0.50	26.60	262.03
	YP20-268-1	47.74	92.47	12.55	45.60	8.27	1.46	7.20	1.22	7.22	1.48	4.01	0.66	4.46	0.63	36.89	271.87
	YP20-229-1	53.20	109.2	14.53	55.29	11.33	2.03	10.34	1.59	8.46	1.57	4.06	0.62	4.18	0.59	37.88	314.87
黑山头组	PM70-107-1	12.37	23.86	2.75	10.11	1.70	0.28	1.37	0.18	0.88	0.14	0.39	0.05	0.38	0.07	4.05	58.58
	PM54-24-1	14.61	32.59	3.55	13.98	2.54	0.44	1.33	0.16	0.71	0.12	0.31	0.05	0.30	0.04	3.11	73.84
	PM57-4-1	35.15	71.23	9.14	35.61	7.39	1.33	6.21	0.98	5.27	1.04	2.76	0.43	2.94	0.43	25.15	205.05
	PM57-1-1	43.91	89.53	11.57	42.09	7.26	1.45	6.21	1.12	6.28	1.29	3.56	0.55	4.02	0.56	33.48	252.89
	PM57-22-1	48.28	95.76	11.98	44.14	8.37	1.45	7.50	1.23	6.73	1.39	3.77	0.60	4.08	0.58	36.98	272.85
黄草岭组	D4414--1	40.59	80.95	10.76	43.97	11.65	2.32	14.80	2.82	15.60	2.88	6.83	0.93	5.42	0.73	81.82	322.07
	D4454--1	27.55	59.78	7.24	28.77	6.50	1.34	7.19	1.27	7.44	1.49	4.04	0.64	4.20	0.61	38.78	196.83
	D4451--1	35.02	73.32	8.56	31.21	6.00	1.16	5.63	0.96	5.29	1.06	2.95	0.46	3.22	0.45	28.50	203.79
	D4447--1	28.72	49.66	6.89	25.20	4.79	1.09	4.91	0.96	5.95	1.23	3.64	0.58	4.17	0.59	33.03	171.41
	D4411--1	19.32	37.89	4.76	18.55	3.89	0.73	3.90	0.66	3.79	0.76	2.14	0.32	2.19	0.32	19.57	118.79

碎屑岩分类图中,昆阳群碎屑岩主要是硬砂岩、页岩和石英砂屑砂岩(图8)。

在微量元素原始地幔蛛网图中可以看出(图9-a),这些碎屑岩(除采自黑山头组中的两件变质石英砂岩样品)微量元素含量分配型式基本一致,均显示高场强元素Nb、Ta和大离子亲石元素Sr的亏损,大离子亲石元素Rb和高场强元素Th相对富集,分析结果见表2。

稀土元素分析结果(表3)表明,采自黑山头组中变质石英砂岩具有较低的稀土总量($58.58 \mu\text{g/g}$ 、 $73.84 \mu\text{g/g}$),其他样品稀土元素总量为 $118.79\sim 407.9 \mu\text{g/g}$ 。昆阳群样品(粉砂岩、泥岩)具有中等的Co/Th比值($0.1\sim 0.7$),中等的Sm/Nd比值($0.17\sim 0.26$),中等的Th/U比值($2.8\sim 8.7$),La/Sc($1.2\sim 9.8$)、Th/Sc($0.6\sim 1.8$)和Zr/Sc($6.8\sim 49.7$),稀土元素Ce无异常,显著的Eu负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.54\sim 0.68$),较强的REE分异($\text{La}_N/\text{Yb}_N=4.7\sim 12.44$)。从稀土元素球粒陨

石标准化图中可以看出(图9-b),碎屑岩总体呈现轻稀土较重稀土富集, Eu具有显著的负异常,显示出具有与活动大陆边缘相似的稀土分布特征。

6 讨论

6.1 昆阳群的形成时代

在缺少古生物资料和火山岩夹层的“哑地层”,碎屑锆石有助于限定地层的沉积时代,一般认为,其中最年轻的锆石年龄可以限定沉积时代的下限^[22-24]。对于滇中地区出露的昆阳群,由于其缺乏古生物资料,仅经历了低级—极低级变质作用,因此碎屑锆石年龄限定其形成时代具有一定的意义。

前人对黑山头组上部出露的凝灰岩夹层进行锆石微区U-Pb同位素分析,获得了(1032.0 ± 9.0) Ma、(1043.0 ± 7.0) Ma、(1031.0 ± 12.0) Ma、(1047.0 ± 15.0) Ma的成岩年龄^[6-8]。Greentree et al.在昆阳群下伏地层老屋山组中获得最年轻的锆石年龄为

续表4

	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
61	37.6	98.4	86.9	1.13	0.1026	0.0030	4.0790	0.1165	0.2847	0.0045	1672.0	53.4	1650.0	23.3	1615.0	22.6
62	92.8	181	203	0.89	0.1163	0.0028	5.2086	0.1186	0.3218	0.0044	1900.0	43.8	1854.0	19.4	1799.0	21.4
63	38.65	46.8	102	0.46	0.1042	0.0027	4.3525	0.1147	0.3001	0.0049	1702.0	48.1	1703.0	21.8	1692.0	24.4
64	95.8	174	254	0.68	0.1009	0.0024	4.1004	0.0830	0.2845	0.0037	1640.0	42.7	1654.0	16.6	1614.0	18.5
65	68.7	151	157	0.96	0.1150	0.0030	4.9378	0.1290	0.3074	0.0053	1880.0	46.3	1809.0	22.1	1728.0	26.1
66	20.72	73.4	83.8	0.88	0.0777	0.0025	1.9427	0.0615	0.1800	0.0032	1139.0	97.2	1096.0	21.2	1067.0	17.5
67	26.48	56.6	110	0.52	0.0722	0.0026	1.8657	0.0660	0.1842	0.0031	991.0	72.7	1069.0	23.4	1090.0	16.9
68	66.00	80.0	331	0.24	0.0718	0.0022	1.6613	0.0491	0.1649	0.0025	981.0	61.1	994.0	18.7	984.0	13.7
69	28.98	49.3	69.8	0.71	0.1097	0.0040	4.5809	0.1593	0.2999	0.0062	1795.0	65.6	1746.0	29.0	1691.0	30.6
70	68.0	70.5	175	0.40	0.1079	0.0026	4.5543	0.1051	0.3021	0.0041	1765.0	43.2	1741.0	19.2	1702.0	20.2
71	68.6	79.0	97	0.82	0.1677	0.0044	10.9835	0.2552	0.4704	0.0085	2535.0	49.2	2522.0	21.7	2485.0	37.1
72	74.0	166	311	0.53	0.0785	0.0022	1.9979	0.0527	0.1828	0.0028	1159.0	54.8	1115.0	17.9	1082.0	15.3
73	45.3	52.8	113	0.47	0.1103	0.0029	4.6950	0.1289	0.3052	0.0051	1806.0	48.2	1766.0	23.0	1717.0	25.2
74	56.16	74.2	272	0.27	0.0730	0.0019	1.7358	0.0451	0.1706	0.0024	1014.0	52.6	1022.0	16.8	1015.0	13.2
75	47.2	142	211	0.67	0.0807	0.0030	1.9574	0.0762	0.1693	0.0032	1215.0	74.1	1101.0	26.2	1008.0	17.5
76	170.6	101	206	0.49	0.2211	0.0051	17.8559	0.4040	0.5797	0.0098	2989.0	37.0	2982.0	21.8	2947.0	40.0
77	52.3	61.2	122	0.50	0.1117	0.0031	5.0679	0.1236	0.3185	0.0051	1827.0	49.7	1831.0	20.7	1783.0	24.9
78	57.9	250	217	1.16	0.0785	0.0023	1.9273	0.0528	0.1776	0.0028	1159.0	58.5	1091.0	18.3	1054.0	15.1
79	55.8	89.7	201	0.45	0.0856	0.0023	2.6126	0.0710	0.2192	0.0034	1329.0	56.5	1304.0	20.0	1278.0	18.0
80	85.8	172	228	0.76	0.0996	0.0021	3.7020	0.0743	0.2680	0.0037	1617.0	33.2	1572.0	16.1	1531.0	18.6
81	15.65	49.1	75.2	0.65	0.0752	0.0029	1.6214	0.0590	0.1563	0.0025	1072.0	77.8	979.0	22.9	936.0	13.9
82	59.0	354	160	2.22	0.0932	0.0033	3.0180	0.1109	0.2333	0.0055	1494.0	62.8	1412.0	28.1	1352.0	28.9
83	38.3	116	102	1.13	0.1055	0.0028	3.6122	0.0936	0.2467	0.0035	1724.0	48.2	1552.0	20.6	1421.0	18.3

注:Pb、Th、U的单位为 10^{-6} 。

(1193.0±15.0) Ma, 在昆阳群上覆地层柳坝塘组中获得了(968.0±15.0) Ma的最年轻锆石年龄, 高林志等在云南晋宁美党组之上的柳坝塘组中采集了凝灰岩锆石, SHRIMP 锆石 U-Pb 获得了(890.0±9.0) Ma 和(834.0±34.0) Ma 的成岩年龄, 从而确定昆阳群的沉积时代为 900~1000 Ma^[5]。本文通过对碎屑锆石 U-Pb 同位素原位微区分析, 从分布于异龙湖南侧昆阳群黄草岭组变质石英砂岩样品 D0366 中获得最年轻的锆石谐和年龄为(984.0±13.7) Ma; 黑山头组变质石英砂岩样品 PM54-24-1 中获得最年轻的锆石谐和年龄为(945.0±11.4) Ma; 从分布于新城乡北侧美党组变质粉砂岩中获得最年轻的锆石谐和年龄为(954.0±13.6) Ma。据此本文进一步限定昆阳群的形成时代为 0.95~1.0 Ga, 为中元古代晚期—新元古代早期。

6.2 沉积岩源岩特征

碎屑沉积岩成分主要受源区岩石组合的影响, 同时风化、搬运、沉积和变质等因素对沉积岩的组成也有重大影响, 碎屑岩的主量元素特征可以揭示风化作用对沉积岩源区及沉积过程中碎屑组成的影响。化学蚀变指数(CIA)通常用来确定源岩的化学风化程度, CIA 指数的计算公式: $CIA=100\times Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO^*+Na_2O+K_2O)$, 其中化学含量均为摩尔

数, CaO* 指存在于硅酸盐矿物中 CaO^[25, 26]。假定 CaO_R 代表样品去除掉磷灰石后的 CaO 摩尔含量, 当 CaO_R>Na₂O 含量时, Na₂O=CaO*; 当 CaO_R≤Na₂O 含量时, CaO_R=CaO*^[27], 以此计算获得 CIA 值。

通常认为, CIA 值在 50 左右的碎屑沉积岩, 其物源区岩石未遭受化学风化, CIA 值为 100, 表明其物源区岩石遭受了强烈的化学风化。其 CIA 值变化范围为 75~85, 平均值为 79(图 10), 显示该碎屑岩经历中等—较高的风化作用, 或者源岩本身就是由风化的碎屑物组成的沉积岩。

稀土元素 Th、Sc、Zr 及 Co 在风化、搬运和成岩过程中属于不活动元素, 可用于判别沉积岩源区的构造环境^[28-30]。通过图 11 可以看出, 在 Th-Co-Zr/10 图中, 昆阳群碎屑岩的构造环境主要属于主动大陆边缘和被动大陆边缘, 并有部分属于大陆岛弧范围; 在 Th-Sc-Zr/10 和 La-Th-Sc 图中, 均属于大陆岛弧环境。

在 Hf-La/Th 图解(图 12-a)中昆阳群样品主要为长英质物源区, 并有部分样品指示有被动大陆边缘物源的加入; 在 La/Sc-Co/Th 图解(图 12-b)中显示昆阳群样品物源主要以长英质火山岩为主, 并有少量的花岗岩和安山岩加入^[23, 30-33]。

根据上述地球化学分析结果, 本文认为滇中地

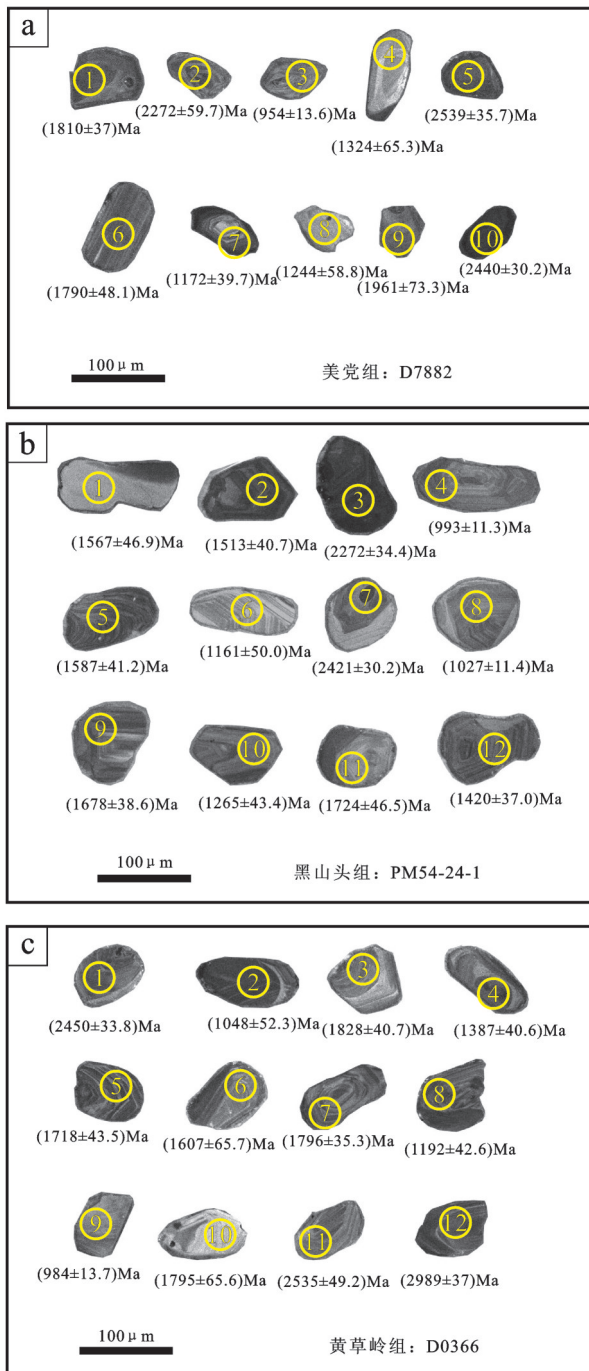


图5 昆阳群代表性碎屑锆石 CL 图
Fig.5 Representative CL images of detrital zircon from the Kunyang Group

区昆阳群碎屑岩的源区具有大陆岛弧-活动大陆边缘环境的特征,更亲近大陆岛弧;同时源岩性质均显示为长英质岩石为主,并有古老沉积物混入。

6.3 昆阳群物源分析

沉积岩中的碎屑锆石年代学,对沉积物源区的确定及邻区构造单元对比有很重要的作用^[19, 34-37]。沉积岩碎屑锆石记录的年龄信息不仅可以限定源区岩石形成年龄或变质结晶年龄,且可用来进行地层形成年代的限制、区域岩石-构造单元对比研究以及古地理格局恢复。

本文获得昆阳群3件碎屑锆石年龄区间为0.95~3.2 Ga,统计显示,在约1.0 Ga、1.35 Ga、1.73 Ga和2.44 Ga出现了统计峰值,包括新元古代、中元古代、古元古代和中-新太古代地质体,昆阳群碎屑岩的全岩地球化学测试结果显示:昆阳群源岩形成于大陆岛弧、活动大陆边缘环境,两者同时说明昆阳群物源具有多样性的特征。其中约1.73 Ga为主峰值,约1.0 Ga、1.35 Ga和2.44 Ga为次峰值,由于锆石类型多为岩浆锆石,其表明昆阳群物源区经历了约1.0 Ga、1.35 Ga、1.73 Ga和2.44 Ga的岩浆事件。

前人对于昆阳群的成因,认为在格林威尔造山期(约1.0 Ga),全球Rodinia超大陆聚合事件中,扬子地块和华夏地块拼合形成华南地块,在扬子西南缘形成了昆阳群的沉积组合,物源来自华夏地块^[5, 8, 17, 37, 38]。江南造山带东段双桥山群中斑脱岩中获得高精度SHRIMP锆石U-Pb年龄为(831.0±6.0~829.0±6.0) Ma^[51],桂黔交界的四堡群斑脱岩中获得SHRIMP锆石U-Pb年龄为842.0 Ma^[52],冷家溪群顶部斑脱岩SHRIMP锆石U-Pb年龄为822.0 Ma,板溪群斑脱岩SHRIMP锆石U-Pb年龄为802.0 Ma^[53]。随着对于江南造山带的逐步认识,目前学术界的基本共识是华南陆块系在新元古代通过晋宁造山运动由华夏和扬子2个块体拼合形成的。

根据碎屑锆石所反映的源区构造热事件,本文搜集扬子地块和华夏地块出露的基底岩浆记录如下(图13):

扬子地区前寒武地层由于后期地层覆盖严重及热事件改造强烈,基底岩石主要包括:峡东地区的崆岭杂岩、扬子西北缘的后河杂岩、云南的大红山群。崆岭杂岩的侵位时间是2.9~3.0 Ga,之后经历约2.73 Ga和约2.0 Ga的变质作用^[39-41]。后河杂岩是扬子西北缘最老的基底岩石,其形成于2.08 Ga^[42]。扬子西南缘的边界是哀牢山-红河断裂带,该地区出露的最老的岩石组合为大红山群,大红山

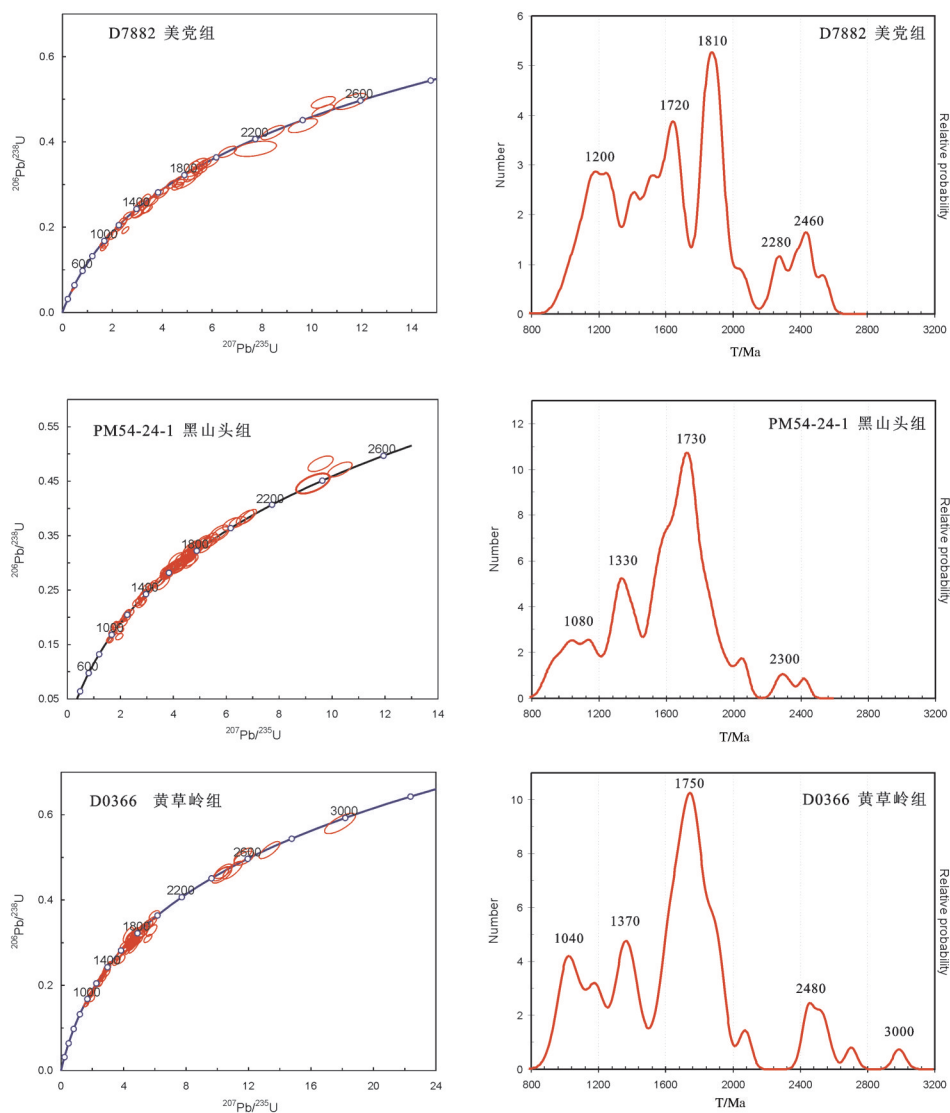


图6 昆阳群碎屑锆石年龄峰谱图

Fig.6 Concordia plots of detrital zircon of the Kunyang Group

群底部主要是变质酸性岩, 变质基性岩, 岩石成岩年龄为 1711~1686 Ma, 变质火山岩形成时代约为 1.7 Ga^[43-45]。

华夏基底岩石主要包括: 浙西南的八都杂岩、浙北诸暨陈蔡杂岩、闽西北天井坪斜长角闪岩及海南的抱板杂岩。八都杂岩中花岗岩具有 1.89~1.83 Ga 的成岩年龄, 天井坪斜长角闪岩形成于 1.77 Ga, 陈蔡杂岩原岩为孔兹岩系, 原岩的形成时代为 (845.0±8.4) Ma^[46, 47]; 抱板杂岩中片麻状花岗岩及变质火山岩的形成年龄为约 1.43 Ga^[48-50]。

通过总结可以看出, 扬子地块陆核区的几期重要构造-岩浆事件分别为 2.9~2.8 Ga, 2.7~2.5 Ga, 2.0~1.8 Ga, 华夏地块陆核的几期重要构造-岩浆事件主要发生在 1.8~1.9 Ga 和 1.43 Ga。扬子地块内部和华夏地块均未见昆阳群中约 1.73 Ga 的主峰值和约 1.35 Ga 和约 1.0 Ga 的次峰值的岩浆事件记录。因此昆阳群的物源并不是来自扬子地块内部或华夏地块。近年的研究资料显示, 扬子西缘存在中元古代晚期-新元古代早期的岛弧岩浆作用或残留洋片的记录^[54]。对比所获得昆阳群碎屑锆石年

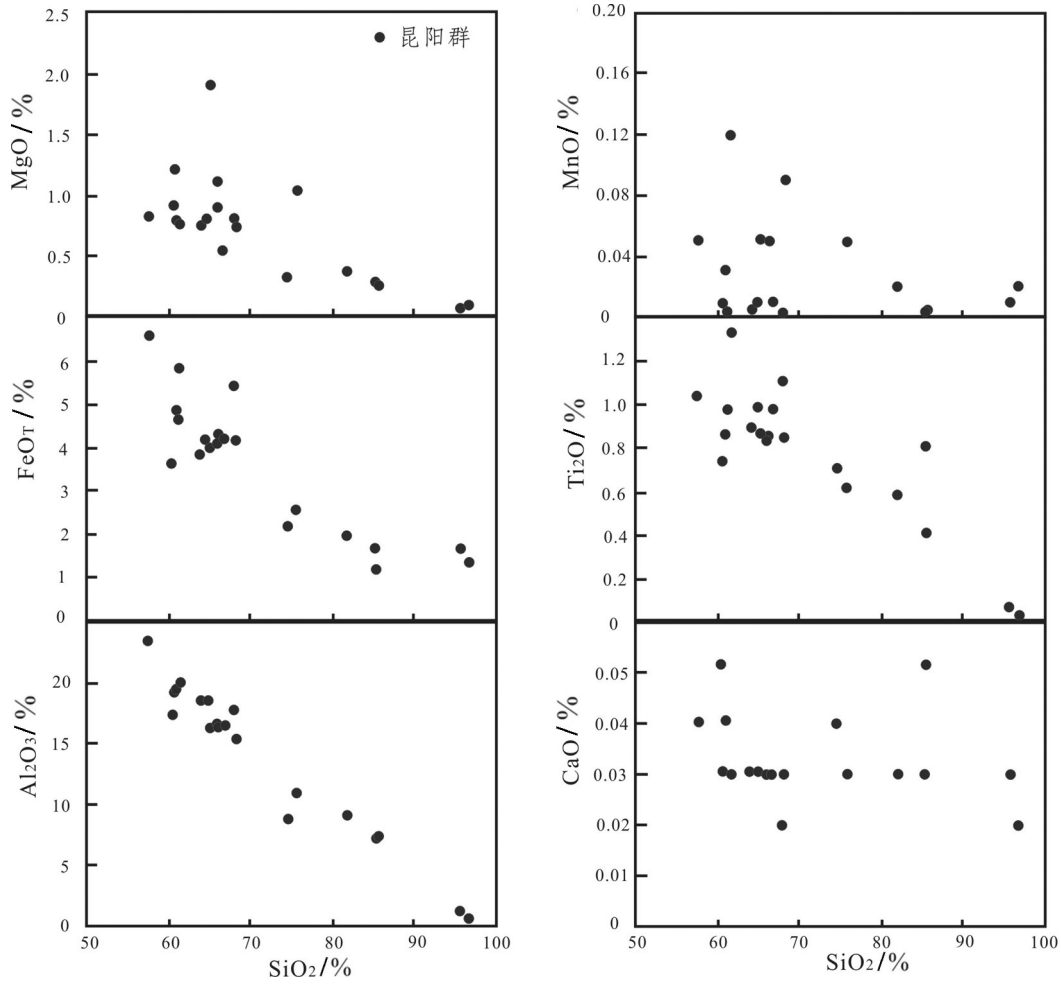


图7 昆阳群碎屑岩主要元素与SiO₂关系图

Fig.7 Bivariate diagrams of major elements composition of the clastic rocks from the Kunyang Group

龄峰谱与华夏地块和扬子地块(分为扬子西南边缘和扬子中部)的前寒武纪碎屑锆石年龄谱发现, 本文的年龄峰谱与扬子西南边缘的年龄峰谱具有很高的吻合度。因此本文推测, 昆阳群的物源可能主要来自扬子地块西南缘。本文认为, 昆阳群的碎屑物质主要来自华夏地块及扬子西南缘约 1.7 Ga 的大红山群。对于昆阳群中 0.9~1.3 Ga 的碎屑锆石, 其锆石自形较好, 磨圆差, 本文认为其来自同格林威尔造山期的物质的风化再沉积。地球化学分析指示昆阳群源岩主要是形成于大陆岛弧—活动大陆边缘的石英质旋回沉积、长英质岩石和少量镁铁质岩石。

在约 1.0 Ga, 全球 Rodinia 超大陆聚合事件中, 扬子地块西南缘发生于格林威尔造山期相关的弧

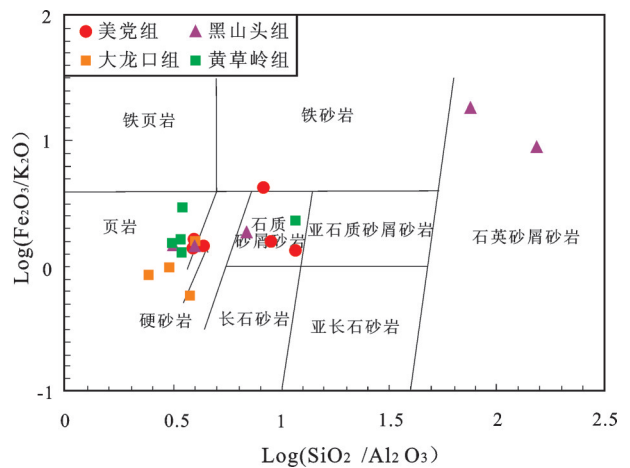


图8 昆阳群碎屑岩分类图

Fig.8 Clastic classification of the Kunyang Group

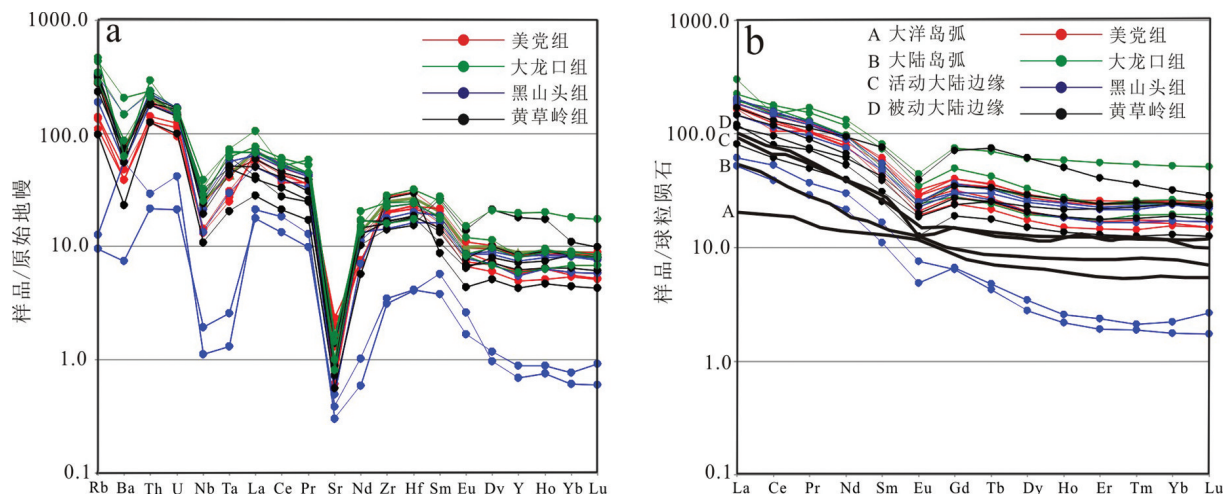


图9 昆阳群碎屑岩微量元素原始地幔标准化蛛网图及稀土元素球粒陨石标准化分布图

Fig.9 Primitive mantle normalized trace element spider diagram and chondrite-normalized REE patterns of the clastic rocks from the Kunyang Group

陆碰撞事件, 该时期, 在扬子地块前陆盆地形成了昆阳群沉积组合^[5, 6, 8, 17]。昆阳群物源主要来自2个方向: 扬子地块边缘的大红山群风化剥蚀并搬运到前陆盆地沉积; 格林威尔期(1.0~1.3 Ga)的岛弧性质的岩体的风化剥蚀并搬运到前陆盆地沉积。昆阳群碎屑岩岩相学显示: 碎屑颗粒主要为棱角-次棱角状, 分选中等, 反映了近源沉积的特点, 这种岩相学特征同样佐证了碎屑物质可能来自附近的地块和造山带的推测。富良棚组的凝灰岩为同造山火山喷发物, 昆阳群中1.0~1.3 Ga的碎屑物质主要来自格林威尔造山带物质的剥蚀。由此形成了昆阳群的滨-浅海相碎屑岩-碳酸盐岩夹火山岩组合(图14)。

7 结 论

(1)整体上昆阳群经历海退和海进2个沉积阶段, 黄草岭组、黑山头组经历了从陆棚滨外带环境到海岸近滨-滨外带反复交替变化的沉积环境的海退过程; 富良棚组沉积时期经历火山事件后, 构造环境转变, 大龙口组、美党组整体经历了从碳酸盐台地环境-礁滩环境-陆棚边缘盆地到滨-浅海陆棚环境沉积的海进过程。

(2)昆阳群中黄草岭组、黑山头组和美党组中最年轻的锆石分别是(984.0±13.7) Ma、(945.0±11.4) Ma、(954.0±13.6) Ma。本文进一步证实了昆阳群形

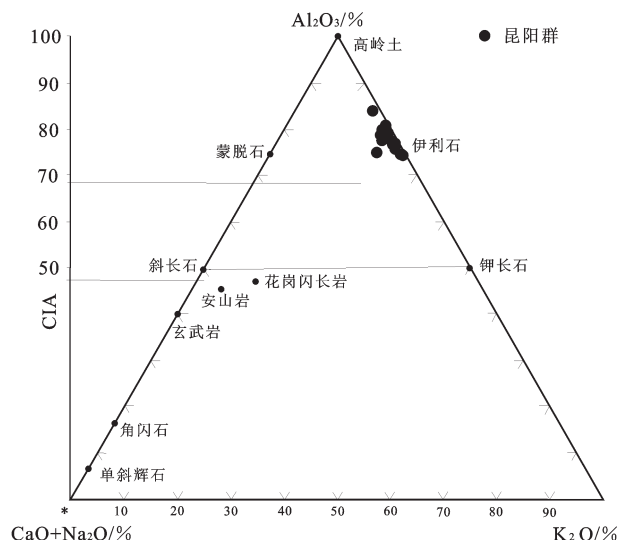


图10 A-CN-K图

Fig. 10 A-CN-K ternary diagram of molecular proportions of $Al_2O_3-(CaO^*+Na_2O)-K_2O$ for the Carboniferous sedimentary rocks

成于中元古代晚期-新元古代早期(0.95~1.0 Ga)。

(3)昆阳群碎屑岩源岩主要为形成于活动大陆边缘、大陆岛弧环境的碎屑岩、长英质岩石、以及少量镁铁质岩石, 源岩经历了中等-较强的化学风化作用。

(4)昆阳群是格林威尔造山期(0.9~1.0 Ga)扬子地块西南缘发生弧陆碰撞, 在扬子地块一侧的弧后

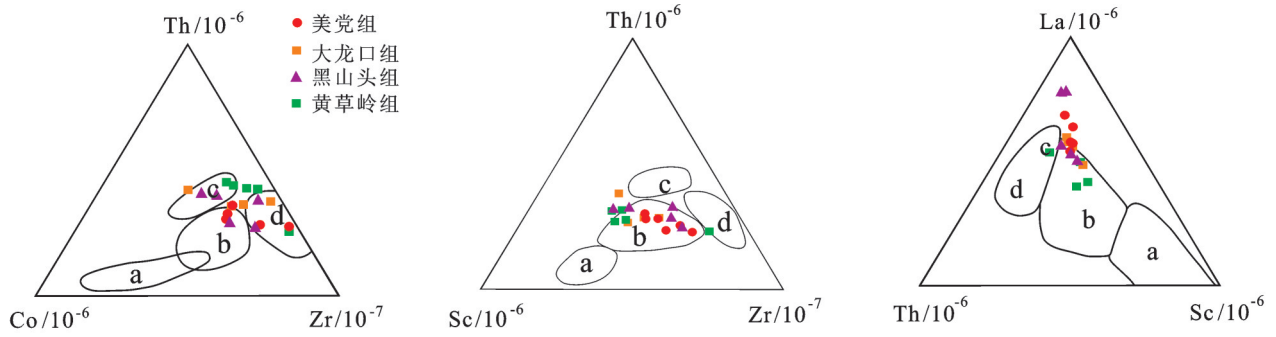


图 11 昆阳群 Th-Co-Zr/10、Th-Sc-Zr/10、La-Th-Sc 微量元素构造环境判别图

a—大洋岛弧; b—大陆岛弧; c—主动大陆边缘; d—被动大陆边缘

Fig. 11 Tectonic setting diagrams using trace elements of Th-Co-Zr/10, Th-Sc-Zr/10, La-Th-Sc from the Kunyang Group
a—Oceanic island arc; b—Continental, island arc; c—Active continental, margins; d—Passive continental margin

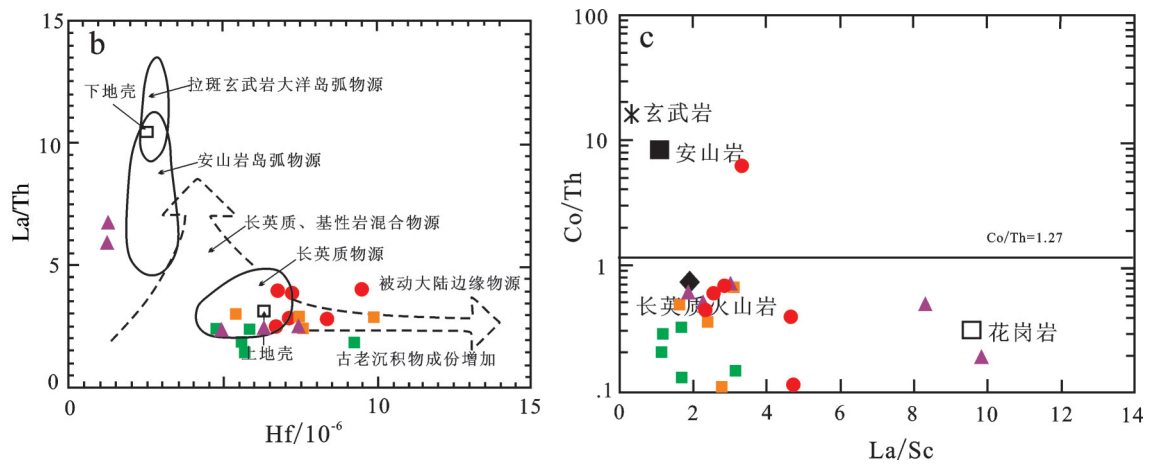


图 12 昆阳群碎屑岩 Hf-La/Th、La/Sc-Co/Th 图 (图例同图 11)

Fig. 12 Hf-La/Th, La/Sc-Co/Th diagrams of the clastic rocks from the Kunyang Group (legends as for Fig. 11)

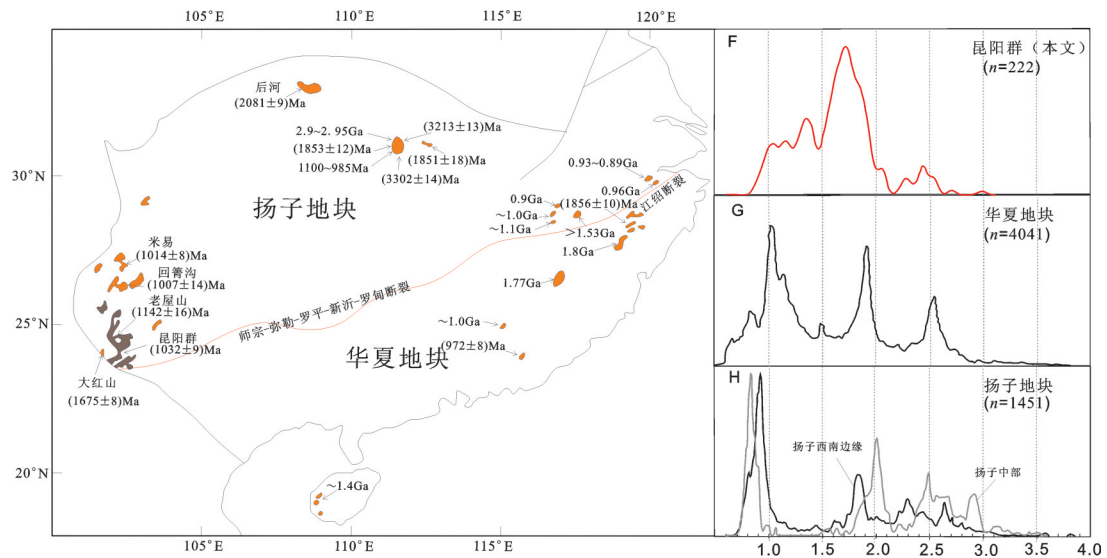


图 13 华南地块 >0.9 Ga 岩体分布图^[17]

Fig. 13 The distribution of rocks older than 0.9 Ga in the Cathaysia block^[17]

前陆盆地形成的沉积组合,其物源主要来自扬子地块西南缘的大红山群及格林威尔期的岩石。

致谢: 在本文撰写过程中,中国地质大学(武汉)徐亚军老师,项目组陈超、陈桂凡等师兄师姐提出了许多宝贵的意见;在野外剖面测制和样品采集中项目组周洋、刘娇、熊昕、郭宏杰、谢德根等提供了帮助;审稿专家及责任编辑杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见,在此表示诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] 吴懋德,李希勤. 云南昆阳群的两种底辟构造[J]. 地质学报, 1981, (2): 105-117.
Wu Maode, Li Xiji. Two types of diapiric structure of the kunyang group, Yunnan [J]. Acta Geologica Sinica, 1981, (2): 105-117 (in Chinese with English abstract).
- [2] 李天福. 东川矿区“小溜口组”地层特征及与因民组的接触关系[J]. 云南地质, 1993, 12(1): 1-11.
Li Tianfu. Stratigraphic characteristics of "Xiaoliukou Formation" and its contact relation with Yinming formation in Dongchuan mining district[J]. Yunnan Geology, 1993, 12(1): 1-11 (in Chinese with English abstract).
- [3] 熊兴武, 侯蜀光. 滇中昆阳群因民角砾岩及其成因[J]. 地质科技情报. 1995: 43-48.
Xiong Xingwu, Hou Shuguang. Yinmin breccia and its origin, Proterozoic kunyang Group, central Yunnan Province[J]. Geological Science and Technology Information. 1995, 14(4): 43-48 (in Chinese with English abstract).
- [4] 戴恒贵. 康滇地区昆阳群和会理群地层、构造及找矿靶区研究[J]. 云南地质, 1997: 1-39.
Dai Hengui. The study of stratum, structure and ore prospecting of Kunyang Group and Huili Group in Kangdian area[J]. Yunnan Geology, 1997: 1-39 (in Chinese with English abstract).
- [5] Greentree M R, Li Z, Li X, et al. Late Mesoproterozoic to earliest Neoproterozoic basin record of the Sibao orogenesis in western South China and relationship to the assembly of Rodinia[J]. Precambrian Research, 2006, 151(1/2): 79-100.
- [6] 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 the central Yunnan: the evidence of the Greenvillian orogeny in Southern China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(7): 818-824 (in Chinese).
- [7] 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, (12): 1917-1932.
Yin Fuguang, Sun Zhiming, Ren Guangming, et al. Geological record of Paleo—Mesoproterozoic orogenesis in the western margin of upper Yangtze Block[J]. Acta Geologica Scientia, 2012 (12): 1917-1932 (in Chinese with English abstract).
- [8] 李怀坤, 张传林, 姚春彦, 等. 扬子西缘中元古代沉积地层锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成[M]. 中国科学: 地球科学, 2013, 1287-1298.
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 China: Earth Sciences, 2013, 1287-1298 (in Chinese with English abstract).
- [9] 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[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(7): 896-900 (in Chinese with English abstract).
- [10] 高林志, 尹崇玉, 张恒, 等. 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[J]. 地质通报, 2015, 34(9): 1595-1604.
Gao Linzhi, Yin Chongyu, Zhang Heng, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating of the Liubatang Formation in the Jinning area, Yunnan Province, and its implication for the Jinning Movement[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(9): 1595-1604(in Chinese with English abstract).
- [11] Wang W, Zhou M F. Provenance and tectonic setting of the Paleoproterozoic to Mesoproterozoic Dongchuan Group in the southwestern Yangtze Block, South China: Implication for the breakup of the supercontinent Columbia[J]. Tectonophysics, 2014, 610(1): 110-127.
- [12] 龚琳. 滇中中晚元古代铜铁矿带成矿规律与找矿[J]. 云南地质, 2011, 30(3): 255-260.
Gong Lin. The metallogenetic rule and prospecting of middle Proterozoic Cu-Fe metallogenetic zone in central Yunnan[J]. Yunnan Geology, 2011, 30(3): 255-260(in Chinese with English abstract).
- [13] 华仁民. 论昆阳拗拉谷[J]. 地质学报, 1990, (4): 289-301.
Hua Renmin. On the Kunyang Aulacogen[J]. Acta Geologica Sinica, 1990, (4): 289-301 (in Chinese with English abstract).
- [14] 牟传龙, 周名魁. 四川会理—会东及邻区中元古代的岩相古地理格局[J]. 特提斯地质. 1998, (00): 32-43.
Mou Chuanlong. Meso-Proterozoic sedimentary faces and palaeogeographic framework of the Huili—Huidong region and its adjacent areas[J]. Tethyan Geology. 1998, (00): 32-43(in Chinese with English abstract).
- [15] 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.
Mou Chuanlong. 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).

- [16] 杜远生, 韩欣. 滇中地区元古代沉积盆地演化及动力学初探[J]. 现代地质, 1999, 13(2): 232-234.
Du Yuansheng, Han Xin. Preliminary notes on evolution and dynamics of the Proterozoic sedimentary basins of central Yunnan[J]. Geoscience, 1999, 13(2): 232-234(in Chinese with English abstract).
- [17] 李献华, 李武显, 何斌. 华南陆块的形成与Rodinia超大陆聚合-裂解——观察、解释与检验[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31: 543-559.
Li Xianhua, Li Wuxian, He Bin. Building of the South China Block and its relevance to assembly and breakup of Rodinia Supercontinent: Observations, interpretations and tests[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012, 31: 543-559(in Chinese with English abstract).
- [18] Sun W, Zhou M, Gao J, 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.
- [19] Wang L, Yu J, Griffin W L, et al. Early crustal evolution in the western Yangtze Block: Evidence from U-Pb and Lu-Hf isotopes on detrital zircons from sedimentary rocks[J]. Precambrian Research, 2012: 368-385.
- [20] Bhatia M R. Plate Tectonics and geochemical composition of sandstones: A reply[J]. Journal of Geology, 1985, 93(1): 85-87.
- [21] Wang B, Wang W, Zhou M. Provenance and tectonic setting of the Triassic Yidun Group, the Yidun Terrane, Tibet[J]. Geoscience Frontiers, 2013, 4(6): 765-777.
- [22] 余振兵. 中上扬子上元古界—中生界碎屑锆石年代学研究[D]. 中国地质大学(武汉), 2007.
She Zhenbing. Detrital Zircon Geochronology of the Upper Proterozoic Mesozoic Clastic Rocks in the Mid-Upper Yangtze Region[D]. China University of Geosciences (Wuhan), 2007(in Chinese with English abstract).
- [23] 杨江海. 造山带碰撞-隆升过程的碎屑沉积响应: 以北祁连志留系、右江二叠—三叠系和大别山南麓侏罗系为例[D]. 中国地质大学(武汉), 2012.
Yang Jianghai. Detrital Record of Collision and Exhumation Processes of Orogen: Studies from the Silurian in North Qilian Belt, the Permian-Triassic in Youjiang Basin and the Jurassic at Huangshi South of Dabie Mountains[D]. China University of Geosciences (Wuhan), 2012(in Chinese with English abstract).
- [24] 万渝生, 苗培森, 刘敦一, 等. 华北克拉通高凡群, 溱沔群和东焦群的形成时代和物质来源: 碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年代学制约[J]. 科学通报, 2010(7): 572-578.
Wan Yusheng, Miao Peisen, Liu Dunyi, et al. Formation ages and source regions of the Palaeoproterozoic Gaofan, Hutuo and Dongjiao groups in the Wutai and Dongjiao areas of the North China Craton from SHRIMP U-Pb dating of detrital zircons: Resolution of debates over their stratigraphic relationships[J]. Chinese Science Bulletin, 2010(7): 572-578 (in Chinese)
- [25] Amp H W N, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299(5885): 715-717.
- [26] Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. Geology, 1995, 23(10): 921.
- [27] Bock B, McLennan S M, Hanson G N. Geochemistry and provenance of the Middle Ordovician Austin Glen Member (Normanskill Formation) and the Taconian Orogeny in New England[J]. Sedimentology, 1998, 45(4): 635-655.
- [28] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1986, 92(2): 181-193.
- [29] 徐亚军, 杜远生, 杨江海, 等. 北祁连造山带老君山组沉积地球化学与物源分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 53(4): 414-425.
Xu Yajun, Du Yuansheng, Yang Jianghai, et al. Sedimentary geochemistry and provenance of the Lower and Middle Devonian Laojunshan Formation, the North Qilian Orogenic Belt[J]. Science China: Earth Science, 2010, 53(4): 356-367(in Chinese with English abstract).
- [30] 徐亚军. 北祁连造山带晚加里东—早海西期造山过程的沉积响应[D]. 中国地质大学(武汉), 2010.
Xu Yajun. Sedimentary Response to the Late Caledonian-Early Hereynian Orogenesis, the North Qilian Orogen[D]. China University of Geosciences (Wuhan), 2012(in Chinese with English abstract).
- [31] 徐亚军, 杜远生, 杨江海. 沉积物物源分析研究进展[J]. 地质科技情报. 2007(03): 26-32.
Xu Yajun, Du Yuansheng, Yang Jianghai. Prospects of sediment provenance analysis[J]. Geological Science and Technology Information, 2007(03): 26-32(in Chinese with English abstract).
- [32] Floyd P A, Winchester J A, Park R G. Geochemistry and tectonic setting of Lewisian clastic metasediments from the Early Proterozoic Loch Maree Group of Gairloch, NW Scotland[J]. Precambrian Research, 1989, 45(1): 203-214.
- [33] Condie K C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales[J]. Chemical Geology, 1993, 104(1): 1-37.
- [34] Mondal M E A, Goswami J N, Deomurari M P, et al. Ion microprobe $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages of zircons from the Bundelkhand massif, northern India: implications for crustal evolution of the Bundelkhand-Aravalli protocontinent[J]. Precambrian Research, 2002, 117: 85-100.
- [35] Wang L, Griffin W L, Yu J, et al. Precambrian crustal evolution of the Yangtze Block tracked by detrital zircons from Neoproterozoic sedimentary rocks[J]. Precambrian Research, 2010, 177(1): 131-144.
- [36] 张进, 李锦轶, 刘建峰, 等. 早古生代阿拉善地块与华北地块之间的关系: 来自阿拉善东缘中奥陶统碎屑锆石的信息[J]. 岩石

- 学报, 2012, (9): 2912–2934.
- Zhang Jin, Li Jinyi, Liu Jianfeng, et al. The relationship between the Alxa Block and the North China Plate during the Early Paleozoic: New information from the Middle Ordovician detrital zircon ages in the eastern Alxa Block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, (9): 2912–2934(in Chinese with English abstract).
- [37] Li X, Li Z, Li W. Detrital zircon U–Pb age and Hf isotope constrains on the generation and reworking of Precambrian continental crust in the Cathaysia Block, South China: A synthesis[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(3): 1202–1215.
- [38] Li X, Li W, Li Z, et al. 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[J]. *Precambrian Research*, 2009, 174 (1/2): 117–128.
- [39] Qiu Y M, Gao S, Mcnaughton N J, et al. First evidence of ~3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of south China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics[J]. *Geology*, 2000, 28(1): 11.
- [40] 焦文放, 吴元保, 彭敏, 等. 扬子板块最古老岩石的锆石 U–Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. *中国科学*, 2009: 972–978.
- Jiao Wenfang, Wu Yuanbao, Peng Min, et al. The oldest basement rock in the Yangtze Craton revealed by zircon U–Pb age and Hf isotope composition[J]. *Science China: Earth Science*, 2009: 972–978(in Chinese with English abstract).
- [41] Gao S, Yang J, Zhou L, et al. Age and growth of the Archean Kongling terrain, South China, with emphasis on 3.3 Ga granitoid gneisses[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(12): 153–182.
- [42] Wu Y, Gao S, Zhang H, et al. Geochemistry and zircon U–Pb geochronology of Paleoproterozoic arc related granitoid in the Northwestern Yangtze Block and its geological implications[J]. *Precambrian Research*, 2012, 200(4): 26–37.
- [43] Greentree M R, Li Z. The oldest known rocks in south western China: SHRIMP U Pb magmatic crystallisation age and detrital provenance analysis of the Paleoproterozoic Dahongshan Group[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 33(5): 289–302.
- [44] Ai Qing H, Bingquan Z, Cunxiao M, et al. Geochronology of the Dahongshan Group[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1991, 10 (3): 195–203.
- [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 southwestern Yangtze Block, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(9): 2994–3014 (in Chinese with English abstract).
- [46] Yu J, Wang L, Reilly S Y O, et al. A Paleoproterozoic orogeny recorded in a long–lived cratonic remnant (Wuyishan terrane), eastern Cathaysia Block, China[J]. *Precambrian Research*, 2009, 174: 347–363.
- [47] 高林志, 丁孝忠, 刘燕学, 等. 江山—绍兴断裂带陈蔡岩群片麻岩 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 2014, 33(5): 641–648.
- Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Liu Yanxue, et al. SHRIMP zircon U–Pb dating of Neoproterozoic Chencai Complex in Jiangshan–Shaoxing fault zone and its implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(5): 641–648(in Chinese with English abstract).
- [48] Li Z, Li X, Li W, et al. Was Cathaysia part of Proterozoic Laurentia? —New data from Hainan Island, south China[J]. *Terra Nova*, 2008, 20(2): 154–164.
- [49] Li X H. U–Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze Block: Timing of Neoproterozoic Jinning Orogeny in SE China and implications for Rodinia Assembly[J]. *Precambrian Research*. 1999, 97(1): 43–57.
- [50] Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic syn–rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 2003, 122(1): 85–109.
- [51] 高林志, 杨明桂, 丁孝忠, 等. 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[J]. *地质通报*, 2008, 27(10): 1744–1751.
- Gao Linzhi, Yang Minggui, Ding Xiaozhong, et al. 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[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27 (10): 1744–1751(in Chinese with English abstract).
- [52] 高林志, 陆济璞, 丁孝忠, 等. 桂北地区新元古代地层凝灰岩锆石 U–Pb 年龄及地质意义[J]. *中国地质*, 2013, 40(5): 1443–1452.
- Gao Linzhi, Lu Jipu, Ding Xiaozhong, et al. Zircon U–Pb dating of Neoproterozoic tuff in South Gaungxi and its implications for stratigraphic correlation[J]. *Geology in China*, 2013, 40(5): 1443–1452(in Chinese with English abstract).
- [53] 高林志, 陈峻, 丁孝忠, 等. 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[J]. *地质通报*, 2011, 30(7): 1001–1008.
- Gao Linzhi, Chen Jun, Ding Xiaozhong, et al. Zircon SHRIMP U–Pb dating of the tuff bed of Lengjiaxi and Banxi Groups, northeastern Hunan: Constraints on the Wuling Movement[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(7): 1001–1008(in Chinese with English abstract).
- [54] 高林志, 尹崇玉, 丁孝忠, 等. 华南地区新元古代年代地层标定及地层对比[J]. *地球学报*, 2015, 36(5): 533–545.
- Gao Linzhi, Yin Chongyu, Ding Xiaozhong, et al. Rating data of the Neoproterozoic chronostratigraphy and stratigraphic correlation in South China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2015, 36 (5): 533–545(in Chinese with English abstract).