



移动阅读

邓奇, 崔晓庄, 汪正江, 等, 2023. 扬子陆块北缘构造演化新认识: 来自原花山群年代学和地球化学的制约[J]. 沉积与特提斯地质, 43(1): 212–225. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.10005](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.10005)

DENG Q, CUI X Z, WANG Z J, et al., 2023. New understanding of the tectonic evolution of the northern margin of Yangtze Block: Constraints from the geochronology and geochemistry of the Huashan Group[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(1): 212–225. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.10005](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.10005)

扬子陆块北缘构造演化新认识：来自原花山群年代学和地球化学的制约

邓奇^{1,2}, 崔晓庄¹, 汪正江¹, 熊国庆^{1,2}, 任光明¹, 宁括步¹

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 四川 成都 610081)

摘要: 原花山群分布于紧邻南秦岭的扬子陆块北缘大洪山地区, 出露于重要的构造部位, 是研究其形成时期扬子陆块构造演化及其与南秦岭关系的重要载体, 其物质组成、形成时代和构造属性长期存在争论。本文将原花山群解体为花山构造混杂岩和正常的火山—沉积地层(本文所指花山群)两部分来讨论。笔者重新厘定了花山群的沉积时限, 有针对性地对有构造背景争议的花山群进行玄武岩地球化学研究, 对有时代争议的混杂岩进行锆石 U-Pb 年代学研究。年代学、地球化学和沉积学综合研究表明, 花山群的沉积时限为 ca. 830 Ma 至 ca. 800 Ma, 形成于与 Rodinia 超大陆裂解有关的陆内裂谷盆地。花山构造混杂岩带可能不只是晋宁期的缝合带, 而是具有多期物质组成、经历了多期构造叠加的复合型缝合带。结合他人成果, 我们提出了扬子陆块与南秦岭从新元古代到早古生代的构造演化新模式。

关键词: 花山群; 构造混杂岩; 陆内裂谷盆地; 构造演化; 扬子陆块北缘; 南秦岭

中图分类号: P59

文献标识码: A

New understanding of the tectonic evolution of the northern margin of Yangtze Block: Constraints from the geochronology and geochemistry of the Huashan Group

DENG Qi^{1,2}, CUI Xiaozhuang¹, WANG Zhengjiang¹, XIONG Guoqing^{1,2},
REN Guangming¹, NING Kuobu¹

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 2. Key Laboratory for Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610081, China)

Abstract: The Huashan Group, distributed in the Dahongshan area on the northern margin of the Yangtze Block that adjoining the South Qinling, is an important carrier to study the tectonic evolution of the Yangtze Block and South Qinling. Long-standing debates persist on the material composition, depositional ages and tectonic nature of the Huashan Group. In this study, the Huashan Group were dismembered into the Huashan tectonic mélange and the Huashan Group that with normal volcanic-sedimentary stratigraphy, and their tectonic natures were discussed separately. Depositional age of the Huashan Group has been redefined here, geochemical

收稿日期: 2022-08-12; 改回日期: 2022-10-18; 责任编辑: 曹华文; 科学编辑: 万友利

作者简介: 邓奇(1983—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事华南前寒武纪地质研究。E-mail: dengqi290@163.com

资助项目: 四川省自然科学基金项目(2023NSFSC0275), 国家自然科学基金项目(41402103, 41772115, 41872120), 中国地质调查局项目(DD20221635)

features of the basalt from the Huashan Group with the controversy of the tectonic background and zircon U-Pb dating of the tectonic mélange with the controversy of the age are studied. A synthesis of geochronological, geochemical, and sedimentological study results indicate that the Huashan Group was deposited during ca. 830–800 Ma and in an intracontinental rift basin which resulted from the breakup of the Rodinia supercontinent. The Huashan tectonic mélange belt may not a product constrained just by the Jinning orogeny, but a complex suture zone with multistage sources and tectonic superposition. Combining the existing study achievements, we propose a new understanding on the tectonic evolution of the Yangtze Block and the South Qinling during the Neoproterozoic to the Early Paleozoic.

Key words: Huashan Group; Tectonic mélange; Intracontinental rift basin; Tectonic evolution; Northern margin of the Yangtze Block; South Qinling

0 引言

扬子陆块是东亚重要的前寒武纪块体之一, 因被证实参与了 Rodinia 超大陆的聚合—裂解过程而备受关注, 是国际地学研究的热点, 特别是扬子陆块在 Rodinia 超大陆重建中的角色和该时期其周缘的地质演化过程(Wang and Li, 2003; Zheng et al., 2008; Li et al., 2008; Qiu et al., 2011; Zhao and Cawood, 2012; Lan et al., 2015; Zhao, 2015)。目前, 取得了较多成果, 如扬子与华夏的碰撞、拼合发生在 ca. 830 Ma(如 Zhao et al., 2011; Zhao and Cawood, 2012; Wang et al., 2013; Zhao, 2015; 邓奇等, 2016), 晚于全球格林威尔造山期(1 300–900 Ma, Li et al., 2008); 扬子陆块在 0.82–0.78 Ga 之后是 Rodinia 超大陆裂解的重要组成部分, 沉积盆地主要为南华裂谷、康滇裂谷和扬子北缘火山—沉积盆地, 其中对南华裂谷和康滇裂谷的研究最为详细, 认为其具裂谷盆地的沉积演化特征(Wang and Li, 2003; Jiang et al., 2012; Wang et al., 2012, 2015; Zhuo et al., 2013; 江新胜等, 2020)。

可以看出, 前期的研究多集中于扬子陆块东南缘和西缘。而由于受秦岭—大别造山带构造活动改造的影响, 扬子陆块北缘新元古代的大地构造背景及盆地的形成演化等相关研究则略显滞后, 也存在更多争论, 如长期俯冲的岛弧模式(Zhou et al., 2002a, 2002b, 2006; Zhao et al., 2011)、大陆裂谷模式(Ling et al., 2003; Deng et al., 2013)、以及由俯冲向陆内裂解的转换(田辉等, 2017), 这严重阻碍了对扬子陆块新元古代构造演化的全面认识。另外, 扬子陆块与南秦岭的构造耦合过程与拼合时间也是重要的科学问题(Liu et al., 2015 及其参考文献; 董云鹏等, 2022 及其参考文献), 对于理解和认识我国区域构造演化至关重要。

原花山群分布于扬子陆块北缘大洪山地区, 主要出露于三里岗—三阳断裂(襄樊—广济断裂的一部分)南西, 其北东侧与南秦岭毗邻, 处于重要的构造部位(图 1), 是研究其形成时期扬子陆块构造演化及其与南秦岭关系的重要载体, 因此其物质组成、形成时代和构造属性一直备受关注。随着研究的深入, 有不少学者将原花山群解体(董云鹏等, 1998; 田辉等, 2017; 刘述德等, 2021), 主体分为两部分: 一是大洪山—仙人岭背斜北东翼以火山岩夹碎屑岩为主的岩系, 二是剩下的以碎屑岩夹玄武岩为主的岩系。前者由于以三里岗—三阳断裂为界紧邻南秦岭, 其形成时代和构造属性争议较大, 主要认识有晚古生代—早中生代的蛇绿混杂岩(董云鹏等, 1998; Dong et al., 1999, 2004)、新元古代的蛇绿混杂岩(Shi et al., 2007)、青白口纪岛弧火山—碎屑岩建造(胡正祥等, 2017)和正常的寒武纪—奥陶纪地层(1: 25 万随州市幅, 2003)。后者为新元古代的认识较为一致, 但其形成的构造背景也有分歧, 如俯冲增生杂岩(胡正祥等, 2015, 2017; 陈超等, 2017)、弧后盆地(刘述德等, 2021)、前陆盆地(张汉金等, 2013)和陆内裂谷盆地(Deng et al., 2013; 田辉等, 2017)等。

通过近几年的野外地质调查、沉积学、年代学等综合研究, 笔者认为上述对原花山群的解体是合理的, 其大洪山—仙人岭背斜北东翼的原花山群部分确有构造混杂岩的特征, 应予以剔除, 而剩下的部分为新元古代正常的火山—沉积地层, 即本文所指的花山群(图 1)。为了能对上述争论提供制约, 我们有针对性地对有构造背景争议的花山群进行玄武岩地球化学研究, 对有时代争议的混杂岩进行锆石 U-Pb 年代学研究, 目的在于(1)厘定花山群的沉积时限, 分析花山群中玄武岩的成因, 结合沉积学综合判定花山群形成的构造背景;(2)限定构造

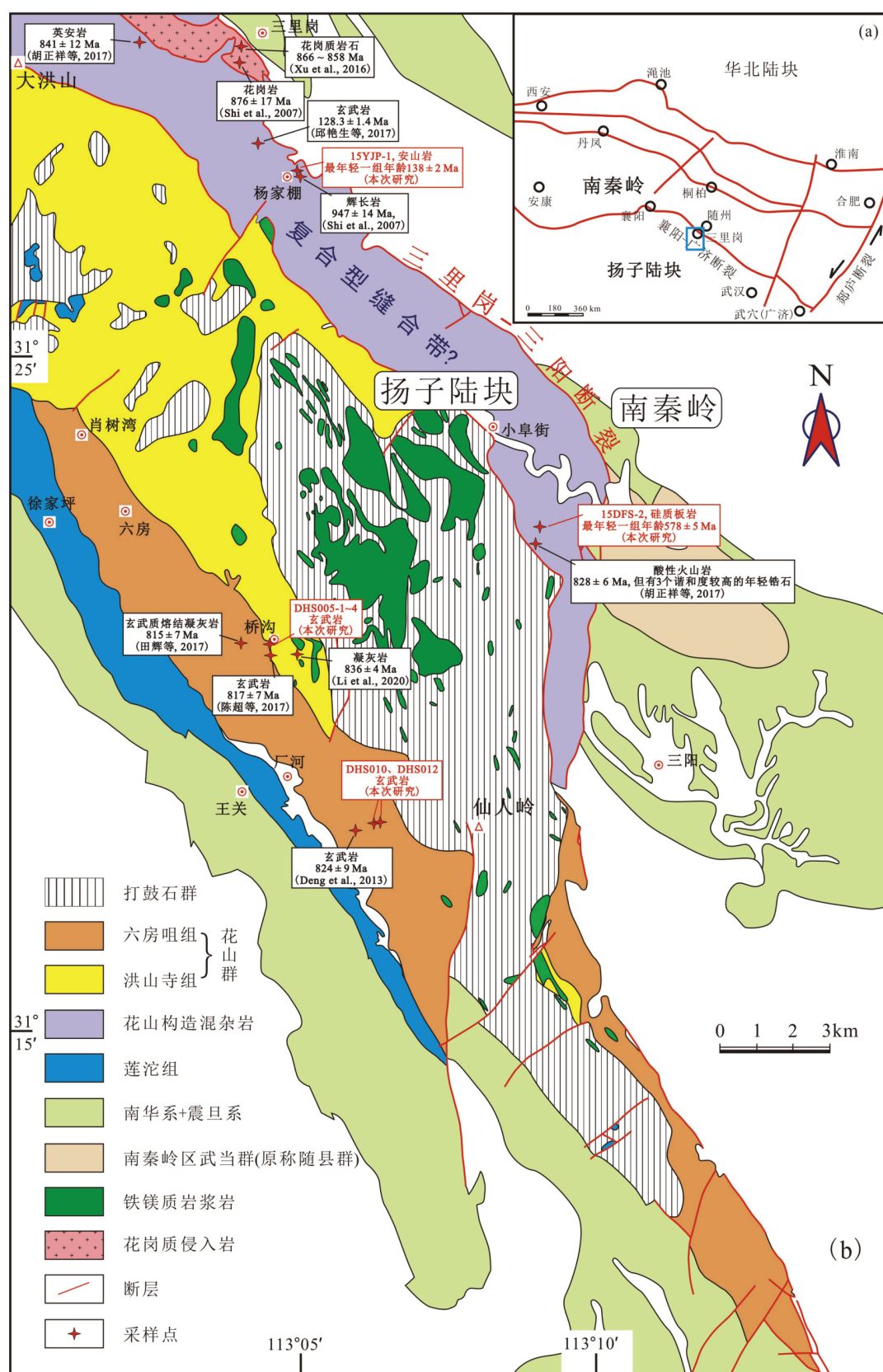


图1 大洪山地区地质简图及采样位置 (图1a据陈超等, 2017修改; 图1b据Deng et al., 2013修改)

Fig. 1 Simplified geological map and sample location in the Dahongshan area (Fig.1a is modified from Chen et al., 2017; Fig.1b is modified from Deng et al., 2013)

混杂岩的时代;(3)探讨扬子陆块北缘与南秦岭新元古代—早古生代的构造耦合过程。

1 区域地质概况及样品特征

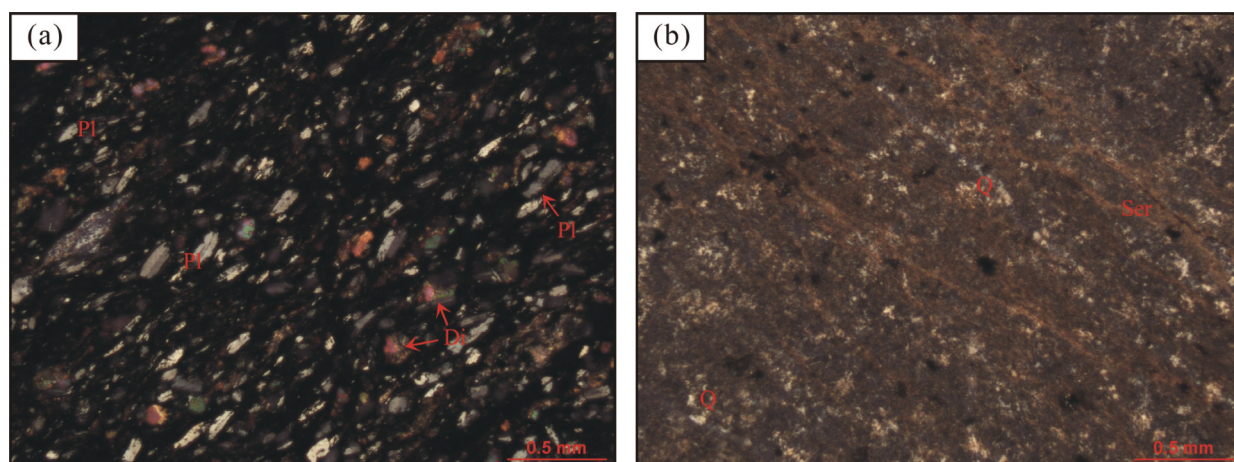
研究区位于扬子陆块北缘大洪山地区,区内以三里岗—三阳断裂为界横跨扬子陆块和秦岭—大别造山带(图 1)。区内出露的前寒武系主要有中元古代打鼓石群,新元古代花山群、莲沱组、武当群(原称随县群)和南沱组等。打鼓石群自下而上为太阳寺组、韩家洼组、罗汉岭组、陈家冲组、李家咀组和当铺岭组,主体为碳酸盐岩夹碎屑岩沉积。莲沱组以紫红色厚层砾岩、含砾长石岩屑砂岩、粗粒岩屑长石砂岩及含粉砂质泥岩为特征。武当群主要出露于襄阳—广济断裂以东的南秦岭区,时代与莲沱组相当,是以碎屑岩—火山碎屑岩为主的变质岩系,未见底。南沱组的主要岩性为灰绿色厚层泥岩和冰碛砾岩。

如前所述,我们将大洪山地区的原花山群解体成两部分来讨论。一是大洪山—仙人岭背斜北东翼从原花山群中剔除的、有构造混杂岩特征的部分,本文称为花山构造混杂岩(图 1),其岩性有玄武岩、辉长岩、安山岩、英安岩、流纹岩、硅质板岩、泥质板岩等(董云鹏等, 1998; 邱艳生等, 2017; 胡正祥等, 2017)。二是剩下的新元古代正常的火山—沉积地层,即本文所指的花山群,为不整合于中元古代打鼓石群和新元古代莲沱组之间的一套轻微变质岩系,包括下部洪山寺组和上部六房咀组(图 1)。其中,洪山寺组主要为一套由砾岩、含砾砂岩、

砂岩所组成的碎屑岩系;而六房咀组则发育了大量的基性火山岩,并夹有泥质板岩、粉砂质板岩、凝灰质板岩等,由于遭受区域变质作用而普遍发生轻微变质和片理化。研究区的侵入岩主要包括北部三里岗花岗质岩石,时代为 876~858 Ma(Shi et al., 2007; Xu et al., 2016),以及大量主要侵入于花山群下部洪山寺组和打鼓石群的辉绿岩脉,时代为 436~433 Ma(陈超等, 2018)。

本文选择时代有争议的杨家鹏蛇绿混杂岩中的安山岩(15YJP-1)和玄武岩(未挑出锆石)、出露于小阜街南东 3 km 处混杂岩中的硅质板岩(15DFS-2)进行锆石 U-Pb 年代学分析,选择花山群中六房咀组的厂河玄武岩(MH010-2~3、MH012-1~3)、桥沟玄武岩(DHS005-1~4)进行全岩主量和微量元素研究。采样位置和微观照片分别见图 1 和图 2。

安山岩:岩石具交织结构,定向构造。主要由斜长石、透辉石组成(图 2a),另见微量石英颗粒。其中,斜长石含量约 76%,呈半自形—他形板条状展布,粒径 0.10~0.24 mm,发育聚片双晶及卡钠复合双晶,整体定向排列,局部被后期方解石交代明显,且在边部分布有较多的隐晶质组分;透辉石含量约 20%,呈他形粒状,粒径 0.08~0.20 mm,部分颗粒柱状横切面隐约可见辉石式解理,整体随斜长石定向排列;石英呈他形细粒状,粒径约 0.08 mm 左右,以微晶的形式充填于斜长石周围。副矿物为不透明金属矿物,可能多为磁铁矿,分布于微晶斜长石的粒间。镜下定名为透辉石安山岩。



Pl—斜长石; Di—透辉石; Q—石英; Ser—绢云母

图 2 安山岩样品 15YJP-1 和硅质板岩样品 15DFS-2 镜下显微照片

Fig.2 Photomicrograph illustrating petrographic characteristics of the andesite sample 15YJP-1 and the siliceous slate sample 15DFS-2

硅质板岩: 岩石具显微晶质—隐晶质结构, 板状构造。主要由显微晶质石英及绢云母组成(图 2b)。其中, 显微晶质石英含量约 65%, 粒径均 $<0.04\text{ mm}$, 发育波状消光, 大部分以微晶的形式展布, 且局部出露有微晶条带; 绢云母含量约 10%, 均为原岩内泥质组分转变而来。原岩可能为含泥质硅质岩类, 镜下定名为硅质板岩。

厂河玄武岩: 岩石具斑状结构, 局部可见杏仁构造。斑晶含量 1%~2%, 主要为钠长石和辉石; 其中, 钠长石少量蚀变, 辉石主要蚀变为碳酸盐矿物。基质具填间结构, 由钠长石、蚀变辉石和少量火山灰泥组成; 条板状的钠长石微晶杂乱分布, 格架中充填辉石微粒和火山灰泥, 辉石部分蚀变为绿泥石和次闪石, 火山灰泥则部分脱玻分解生成绿泥石, 不均匀充填于钠长石间隙。

桥沟玄武岩: 岩石也具斑状结构, 局部可见气孔—杏仁构造。主要由基性斜长石和辉石组成, 岩石受到了较强的碳酸盐化。基性玻璃已脱玻化形成绿泥石、绿高岭石等, 基性斜长石多次生为绿帘石、方解石、黏土矿物等。

2 分析方法

用于全岩主量元素和微量元素分析的样品, 无污染粉碎至 200 目以下。主量元素由中国地质调查局成都地质调查中心用 X 荧光光谱法测试, 所用仪器为 PANalytical 生产的 AXIOS 荧光光谱仪, 误差约为 3%, 其中 FeO 用容量法分析, 烧失量是将样品加热到 1000°C 时获得。微量元素在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS (Agilent7500a) 完成, 样品溶解采用混合酸(1.5 mL 高纯硝酸+1.5 mL 高纯氢氟酸)在 Teflon 高压密闭容弹中进行, 以确保所有难溶矿物均被溶解。实验过程中, 对国际标准参考物质 AGV-2、BHVO-2、BCR-2、RGM-1 和 GSR-1 的分析结果表明, 微量元素的分析精度和准确度优于 5%。

岩石样品经破碎、淘洗、重液分离和电磁分离后, 在双目镜下挑选晶形完好、具有代表性的锆石颗粒粘在树脂台上, 打磨抛光, 制成样靶。然后对锆石进行反射光、透射光显微照相和阴极发光(CL)图像分析, 确定锆石的内部结构和成因, 以选取最

佳的待测锆石部位。锆石 U-Pb 定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用激光剥蚀(LA)—电感耦合等离子体质谱仪(ICP—MS)分析完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, 质谱为 Agilent 7500a。本次实验所采用的激光束斑直径为 $32\text{ }\mu\text{m}$, 每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。详细的仪器操作条件和数据处理方法同文献(Liu et al., 2008)。锆石 U-Pb 测年结果见附表 1*, 全岩主微量元素成分见附表 2*。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

3.1.1 样品 15DFS-2 (硅质板岩)

样品 15DFS-2 锆石粒度较小, 部分晶体表面发育裂纹, 长度一般为 $50\sim100\text{ }\mu\text{m}$, 长宽比以 1:1~2:1 为主。锆石多呈半自形至他形、次棱角状至次圆状的形态特征, 多数有不同程度的磨圆。阴极发光(CL)图像中, 部分锆石具有明显的振荡环带结构, 部分为弱振荡环带或板状无分带结构; 锆石形态不一, 具有碎屑锆石的特征(图 3)。

对该样品的 56 颗锆石进行了 U-Pb 同位素年龄测定, 其中 36 颗给出了有效年龄(谐和度 $\geq 90\%$), 这些有效年龄颗粒的 Th 和 U 的含量分别为 $47\times10^{-6}\sim724\times10^{-6}$ 和 $46\times10^{-6}\sim2199\times10^{-6}$, Th/U 比为 0.18~1.29, 表明它们均为岩浆成因。36 个有效年龄介于 574~2766 Ma 之间, 主要集中分布于 574~599 Ma、611~615 Ma、776~872 Ma 和 2421~2603 Ma 4 个区间; 相对概率峰值或峰值区间为 ca. 579 Ma、ca. 614 Ma、800~860 Ma、ca. 2465 Ma(图 4)。最年轻一组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 $577.6\pm4.9\text{ Ma}$ (MSWD = 0.27, $n = 4$)(图 4a), 代表了该样品的最大沉积年龄。

3.1.2 样品 15YJP-1 (安山岩)

样品 15YJP-1 锆石的粒度更小, 长度一般为 $40\sim80\text{ }\mu\text{m}$, 长宽比以 1:1~2:1 为主。锆石以半自形、次棱角状至次圆状的形态特征为主。阴极发光(CL)图像中, 大部分锆石都具有振荡环带结构; 锆石形态不一, 应为不同期次的锆石(图 3)。

对该样品的 23 颗锆石进行了 U-Pb 同位素年龄测定, 其中 18 颗给出了有效年龄(谐和度 $\geq 90\%$),

*数据资料联系编辑部或者登录本刊网站获取。

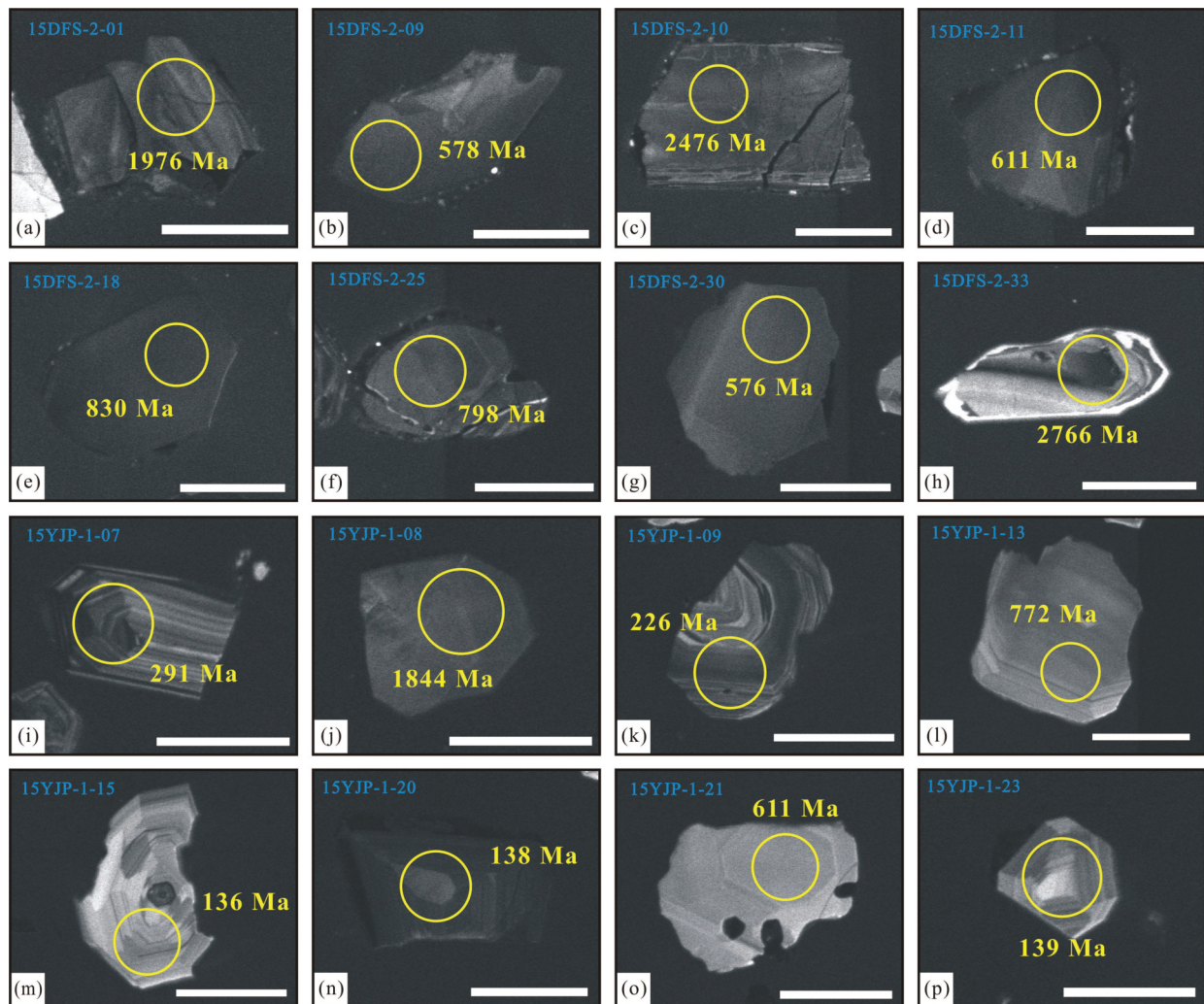


图3 安山岩样品 15YJP-1 和硅质板岩样品 15DFS-2 代表性锆石 CL 图像 (比例尺均为 50 μm)

Fig. 3 Cathodeluminescence (CL) images of typical zircon grains of the andesite sample 15YJP-1 and the siliceous slate sample 15DFS-2

这些有效年龄颗粒的 Th 和 U 的含量分别为 $42 \times 10^{-6} \sim 843 \times 10^{-6}$ 和 $60 \times 10^{-6} \sim 1044 \times 10^{-6}$, Th/U 比为 0.19~0.90, 表明它们以岩浆锆石为主。18 个有效年龄的年龄区间较宽, 为 136~2 283 Ma。最年轻一组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 $137.9 \pm 1.8 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.27, n = 4$) (图 5)。从上述的锆石形态和年龄谱系特征来看, 笔者认为多数应为安山岩捕获的锆石, 其最年轻一组 $137.9 \pm 1.8 \text{ Ma}$ 的年龄应代表了该安山岩的最大形成年龄。

3.2 花山群玄武岩的元素地球化学

本次研究的玄武岩采自花山群的六房咀组, 分别来自厂河剖面 and 桥沟剖面。虽然本次研究未做玄武岩的年龄, 但 Deng et al. (2013) 在此次厂河剖面采样玄武岩的上部层位获得玄武岩的年龄为 ca.

824 Ma, 陈超等 (2017) 和田辉等 (2017) 在此次桥沟剖面采样玄武岩附近报道的玄武岩和玄武质熔结凝灰岩的年龄分别为 ca. 817 Ma 和 ca. 815 Ma, 限定了此次采集玄武岩样品的时代。

3.2.1 厂河玄武岩

选择了 5 件样品进行主量和微量元素分析, 结果列于附表 2^{*}。从表中可以看出, SiO_2 含量变化于 48.33%~52.16%, Ti_2O 含量较低, 为 1.35%~1.76%, FeO^{T} 含量在 8.06%~10.27% 之间, MgO 含量介于 4.65%~6.32%, $\text{Mg}^{\#}$ 值为 0.47~0.56, 为分异演化的岩浆组分。考虑到样品经历了蚀变, 主量元素 (如 K, Na) 可能会发生一定的变化, 因此选用受蚀变影响小的 Nb/Y-Zr/TiO₂ 图解进行岩石分类, 所有厂河玄武岩样品 Nb/Y 比值 ≤ 0.08 , 落入亚碱性玄武岩范

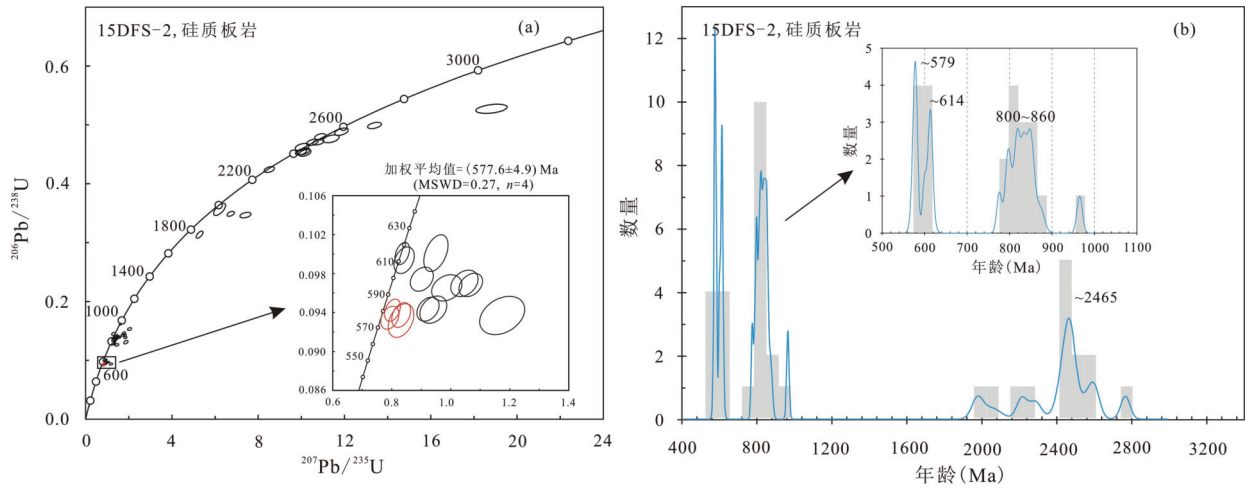


图4 硅质板岩样品15DFS-2 锆石 U-Pb 年龄谐和图 (a) 与年龄分布直方图 (b)

Fig. 4 U-Pb isotopic concordia diagrams (a) and age histograms (b) of the siliceous slate sample 15DFS-2

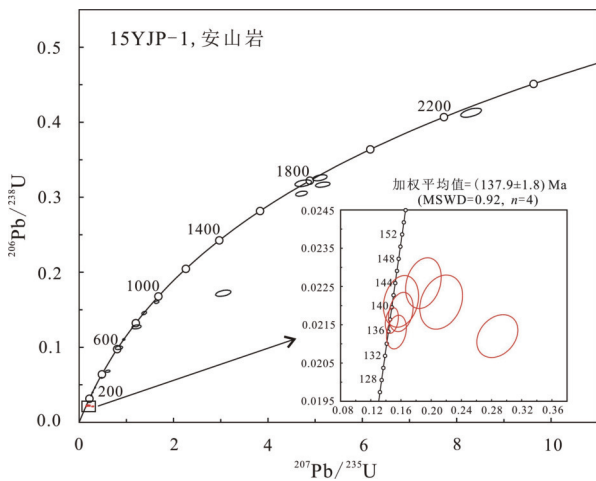


图5 安山岩样品15YJP-1 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 U-Pb isotopic concordia diagrams of the andesite sample 15YJP-1

围(图6a);用Ta/Yb-Th/Yb图解进一步区分钾玄质、钙碱性和拉斑系列,所有的样品皆投于拉斑玄武岩区(图6b)。

厂河玄武岩的稀土元素含量相对较低($\Sigma\text{REE}=43.0\times10^{-6}\sim61.5\times10^{-6}$),根据REE的分布形式(图7a),轻稀土略微亏损,显示平坦或略左倾的稀土分配模式($\text{LREE}/\text{HREE}=1.32\sim1.92$, $\text{La}_N/\text{Yb}_N=0.67\sim1.23$),总体而言,样品位于洋中脊玄武岩(N-MORB)和洋岛玄武岩(OIB)之间,轻重稀土分异不明显,这与亏损轻稀土的典型洋中脊玄武岩有差异。在原始地幔标准化蛛网图(图7b)上,微量元素显示平坦或略具左倾的分布形式,Nb和Ta相对亏损,但不及岛弧玄武岩显示得那么强烈;相对低的Nb/La

和Nb/Th比值也与洋岛玄武岩相区别(0.33~0.70对比1.30, 4.18~6.33对比12.00)。

3.2.2 桥沟玄武岩

选择了4件样品进行主量和微量元素分析,结果列于附表2^{*}。从表中可以看出,SiO₂含量为41.71%~53.14%,Ti₂O含量相比厂河玄武岩总体偏高,为1.19%~2.44%,FeO^T含量介于7.89%~12.48%之间,MgO含量变化于4.58%~8.75%,Mg[#]值为0.44~0.57,也为分异演化的岩浆组分。桥沟样品经历了更强的蚀变,因此同样选用受蚀变影响小的Nb/Y-Zr/TiO₂图解进行岩石分类,桥沟玄武岩Nb/Y比值 ≥ 0.65 ,落在了碱性玄武岩的区域内(图6a)。

球粒陨石标准化稀土元素配分图显示(图7a),桥沟玄武岩稀土元素含量相对较高($\Sigma\text{REE}=140.0\times10^{-6}\sim226.0\times10^{-6}$),轻稀土富集,显示右倾的稀土分配模式($\text{LREE}/\text{HREE}=6.66\sim8.34$, $\text{La}_N/\text{Yb}_N=7.24\sim9.61$),轻重稀土分异明显,与洋岛玄武岩(OIB)的特征相似;在原始地幔标准化蛛网图(图7b)上,微量元素显示右倾的分布形式,但Nb和Ta相对亏损,与典型的洋岛玄武岩(OIB)有差异。

4 讨论

4.1 花山群的沉积时限及构造属性

4.1.1 花山群的沉积时限

近年来通过年代学研究,本文所指的花山群时代确认为新元古代,但其准确的沉积时限一直存在争论,如820~815 Ma(田辉等, 2017)、810~780 Ma(Huang et al., 2021)。

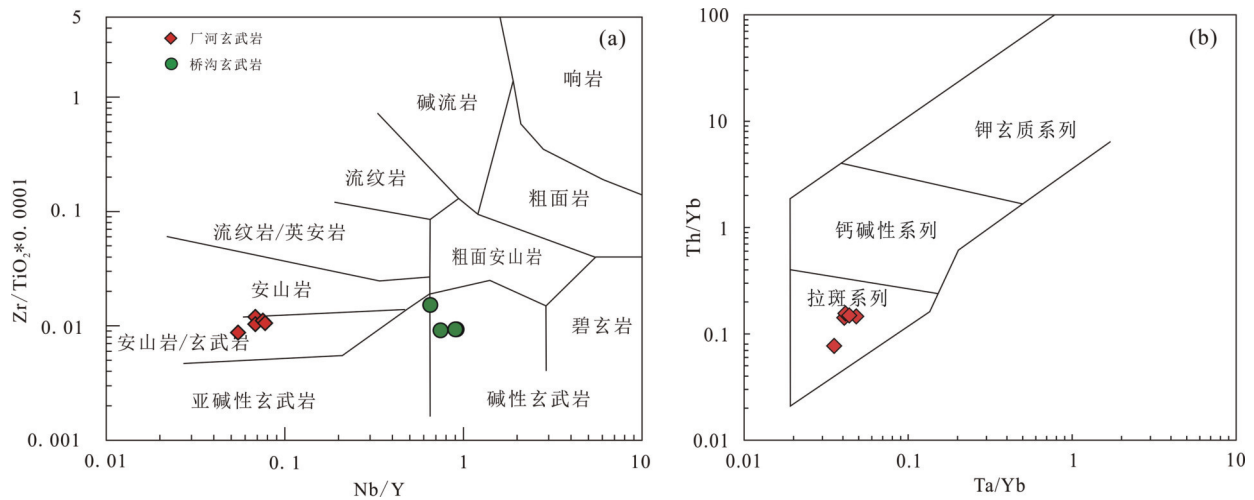
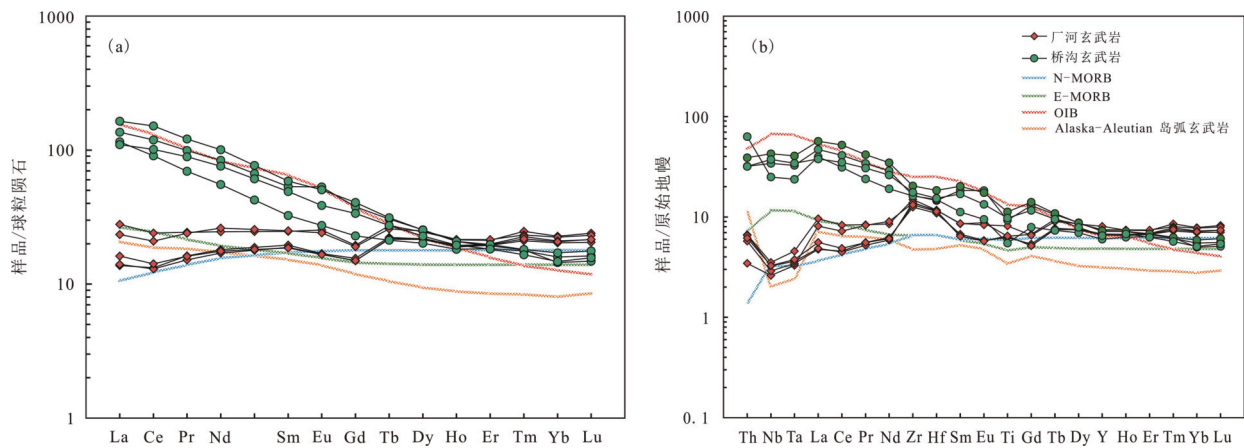
图6 花山群玄武岩的 Nb/Y-Zr/TiO₂ 岩石分类图解 (a) 和 Ta/Yb-Th/Yb 图解 (b)Fig. 6 Nb/Y versus Zr/TiO₂ diagram (a) and Ta/Yb versus Th/Yb diagram (b) for the basalts from the Huashan Group

图7 花山群玄武岩球粒陨石标准化稀土元素配分图 (a) 和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b) (原始地幔标准化数据、球粒陨石标准化数据引自文献 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized spidergrams (b) for the basalts from the Huashan Group (Normalized values for primitive mantle and chondrite are from Sun and McDonough, 1989)

如前所述,一些学者在不同的采样点获得了相近的六房咀组火山岩锆石 U-Pb 年龄,例如 824±9 Ma (Deng et al., 2013)、815±7 Ma (田辉等, 2017) 和 815±7 Ma (陈超等, 2017),证实了花山群为新元古代中期的产物。最近, Li et al. (2020) 在洪山寺组二段底部获得的凝灰岩年龄为 836±4 Ma, 与上述六房咀组获得的年龄在层位上一致,其下部洪山寺组一段主体为粗碎屑岩,沉积速率较大,结合 Huang et al. (2021) 获得的洪山寺组 828±4 Ma 的最大沉积年龄,我们认为花山群的底界年龄应在 ca. 830 Ma。

目前,关于花山群的顶界年龄,还缺乏直接的火山岩年龄来标定,但可以通过花山群顶部碎屑锆

石和上覆莲沱组底部凝灰岩的锆石年龄来约束。Yang et al. (2018) 获得的六房咀组中部长石砂岩最年轻一组锆石年龄的加权平均值为 816±9 Ma; Li et al. (2020) 报道的六房咀组上部变砂岩最年轻一组锆石年龄的加权平均值为 815±5 Ma; Huang et al. (2021) 对花山群碎屑岩进行了锆石 U-Pb 定年研究,获得六房咀组的最大沉积年龄为 810±8 Ma,由此可知,花山群的顶界年龄应该小于 810 Ma。另一方面, Du et al. (2013) 报道的花山群上覆莲沱组中下部凝灰岩的锆石 U-Pb 年龄为 779±12 Ma; 而笔者也获得了大洪山地区莲沱组底部 798±5 Ma 的凝灰岩年龄 (邓奇等, 待刊数据), 因此,花山群的顶

部年龄应大于798 Ma, 在 810~798 Ma 之间, 我们将花山群的顶界年龄暂时限定在 ca. 800 Ma。

4.1.2 花山群玄武岩的成因

花山群玄武岩烧失量(LOI)偏高(特别是桥沟玄武岩), 其原因是玄武岩后期遭受了不同程度的蚀变作用, Na、K 和大离子亲石(LILE)等易迁移元素的含量可能会发生改变, 但不易迁移的稀土(REE)和高场强元素(HFSE)基本不受影响。另外, 近乎平行的微量元素配分模式(图 7)也表明不易迁移元素(REE、HFSE)可用于地壳混染、幔源属性和构造背景等研究。

花山群桥沟和厂河玄武岩具有较低的 Th/Nb 比(平均值分别为 0.16 和 0.22), 低于大陆地壳(平均值为 0.44)(Weaver, 1991), 这表明地壳混染在所研究的样品形成过程中的作用并不明显。样品具有一致的 Nb/Ta 比值(桥沟玄武岩 18.17~18.96, 平均值为 18.44; 厂河玄武岩 13.42~15.68, 平均值为 14.52), 均高于地壳平均值(12~13)(Barth et al., 2000), 其中厂河玄武岩与 OIB 地幔源区的平均值(15.9±0.6)(Pfänder et al., 2007)接近, 而桥沟玄武岩则高于 OIB 地幔源区的平均值, 基本可排除强烈地壳混染的可能性。因此, 花山群玄武岩未受到地壳混染的实质影响。

玄武质岩浆主要存在大陆岩石圈地幔和软流圈地幔两种源区。Fitton et al. (1988)通过对美国西部地区玄武岩的研究表明, 来自岩石圈地幔的玄武质岩浆通常具有 >1.5 的 La/Nb 比值, 而软流圈地幔来源的岩浆通常具有 <1.5 的 La/Nb 比值。本次厂河玄武岩的 La/Nb 比值的范围为 1.44~2.99, 平均值为 2.06, 显示了岩石圈地幔来源特征, 而桥沟玄武岩的 La/Nb 比值的范围为 0.97~1.53, 平均值为 1.28, 支持软流圈地幔来源。另外有研究表明, 来自软流圈地幔的铁镁质岩浆一般具有较低的 La/Ta 比值(<22)(Leat et al., 1988)。厂河玄武岩的 La/Ta 比值的范围在 22.50~41.19 之间, 平均值为 29.42, 而桥沟玄武岩的 La/Ta 比值范围为 18.48~28.14, 平均值为 23.54, 与软流圈地幔来源岩浆类似。

在 Zr/Y-Zr 构造判别图中, 厂河玄武岩和桥沟玄武岩均落在板内玄武岩的范围(图 8a)。在 Ti-V 相关图上, 厂河样品的 Ti/V 值均 >20, 高于岛弧玄武岩的 Ti/V 值(≤20), 而与洋中脊玄武岩和大陆

溢流玄武岩相当; 而桥沟样品的 Ti/V 值均 >50, 显著高于岛弧玄武岩的 Ti/V 值(≤20)(图 8b)。在微量元素蛛网图上(图 7b), 厂河玄武岩样品的不相容元素含量总体上高于岛弧玄武岩, 介于洋岛玄武岩和岛弧玄武岩之间; 而桥沟玄武岩与洋岛玄武岩有相似性, 但因其存在 Nb-Ta 和 Ti 的负异常而显示与典型洋岛玄武岩特征的差异。

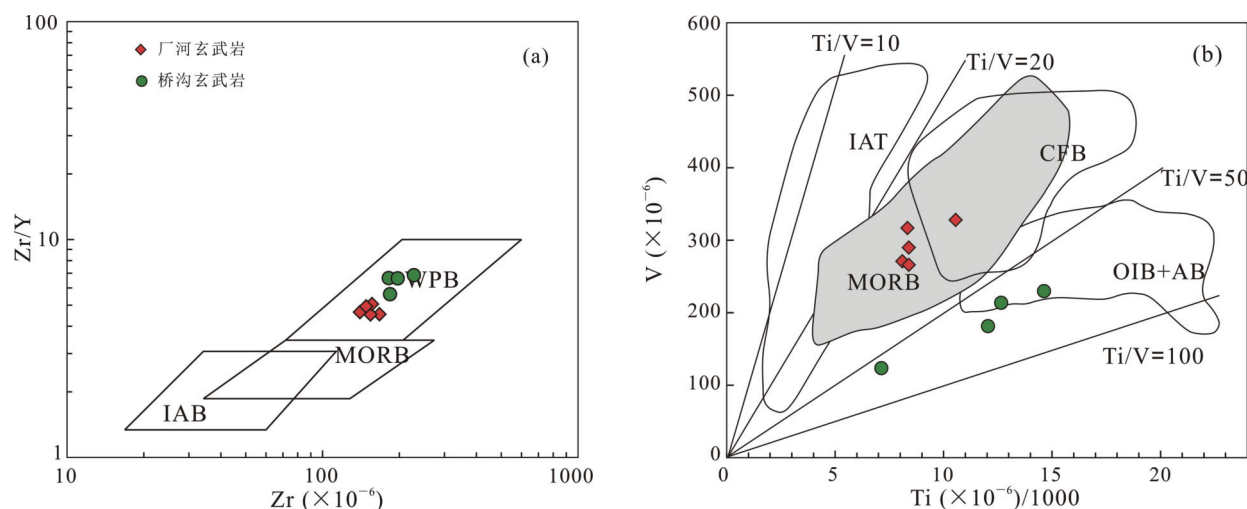
综合地球化学特征, 本文认为花山群玄武岩既有来源于岩石圈地幔的, 也有来自软流圈地幔的, 玄武岩可能形成于板内或洋中脊, 而非岛弧环境。

4.1.3 花山群形成的大地构造背景

通过多次野外地质调查发现, 花山群地层出露较好, 只经历了轻微的变质变形作用, 主要为一套由碎屑岩和火山岩所构成的火山—沉积序列。应当指出的是, 火山—沉积序列记录了形成时的沉积环境、岩浆作用、构造运动等多种信息, 是可通过沉积学、岩石地球化学等进行盆地类型分析、探究盆地形成演化的重要对象。

如上所述, 通过地球化学研究, 花山群玄武岩可能形成于板内或洋中脊。区域上, 虽然有学者认为, 扬子西缘、北缘在新元古代时期为活动大陆边缘, 扬子陆块是由俯冲所致的弧后盆地(Zhou et al., 2002a, b, 2006; Zhao et al., 2011), 但是也有不少研究成果支持扬子陆块新元古代中期岩浆活动与大陆裂谷有关, 例如扬子东南缘益阳的科马提岩(Wang et al., 2007), 北缘铁船山组、碧口群和花山群的大陆溢流玄武岩(Ling et al., 2003; Wang et al., 2008; Deng et al., 2013), 西缘苏雄组的碱性玄武岩(Li et al., 2002)等。李献华等(2008)和 Wang et al. (2009)对华南 830~750 Ma 的玄武质岩石进行综合分析显示, 这些玄武质岩石总体上以拉斑系列和碱性系列玄武岩组合为特征, 很少有钙碱性系列岩石, 其原始岩浆地幔潜能温度(t_p)具有明显高于同时代洋中脊型玄武岩(MORB)源区(1350~1450℃)的特征, 如益阳科马提岩地幔源区的 t_p 约为 1618℃, 比 MORB 地幔高约 260℃, 进而认为这些玄武质岩石是与导致 Rodinia 超大陆裂解的地幔柱有关。

实际上, 对于花山群火山—沉积序列形成的大地构造背景, 我们不仅要依据玄武岩的地球化学特征, 更要通过沉积学研究加以约束。通过研究认为, 花山群自下而上经历了由扇三角洲—较深水饥饿盆地的沉积演化过程。从沉积序列特征分析, 这是



WPB 为板内玄武岩; MORB 为洋中脊玄武岩; IAB 为岛弧玄武岩; IAT 为岛弧拉斑玄武岩; CFB 为大陆溢流玄武岩; OIB 为洋岛玄武岩; AB 为碱性玄武岩

图 8 花山群玄武岩 Zr-Zr/Y 判别图 (a, 底图据 Pearce and Norry, 1979) 和 Ti-V 判别图 (b, 底图据 Shervais, 1982)

Fig. 8 Discrimination diagrams of (a) Zr versus Zr/Y (after Pearce and Norry, 1979) and (b) Ti versus V (after Shervais, 1982) for the basalts from the Huashan Group

一个相变较快、沉积环境由陆地迅速转变为较深水盆地的过程, 之后被莲沱组大规模的移地陆相或滨岸相不整合超覆(Deng et al., 2016), 符合大陆裂谷盆地半地堑盆地的沉积充填特征, 花山群和莲沱组分别为大陆裂谷幼年期小型半地堑盆地和成熟期大型半地堑盆地的产物, 与 Zhuo et al.(2013)和崔晓庄等(2014)在扬子陆块西缘康滇裂谷盆地建立的陆良组下段—澄江组沉积期盆地构造模型相似, 他们认为康滇新元古代裂谷盆地为陆内裂谷盆地, 是 Rodinia 超大陆裂解的产物。Wang and Li(2003)从沉积学和盆地分析入手, 对扬子陆块东南缘和西缘新元古代盆地进行了较为系统的研究, 总结出代表盆地早期形成阶段的成因相组合有: 冲洪积相组合、陆相(或海相)火山岩及火山碎屑岩相组合、滨浅海相沉积组合、淹没碳酸盐台地及欠补偿盆地黑色页岩相组合, 认为其具有典型的大陆裂谷盆地的演化特征。

综合上述讨论, 我们认为花山群形成于陆内裂谷盆地的解释更为合理, 是 Rodinia 超大陆裂解在扬子陆块的响应。

4.2 花山构造混杂岩的形成时代及对构造演化的制约

构造混杂岩的厘定对于了解区域构造演化意义重大。如前所述, 花山构造混杂岩位于大洪山—仙人岭背斜北东翼, 呈长条状、北西—南东向展布

(图 1)。由于紧邻南秦岭, 因此它是探讨扬子陆块与南秦岭构造耦合过程的重要载体。目前其混杂岩特征已基本达成共识, 但其时限还存在较大争论。最先将其称为混杂岩的是董云鹏, 认为其是晚古生代—早中生代的蛇绿混杂岩(董云鹏等, 1998; Dong et al., 1999, 2004)。田辉等(2017)则将其厘定为晋宁期的蛇绿混杂岩。胡正祥等(2017)通过调查研究, 将这套花山构造混杂岩定义为土门岩组, 代表了青白口纪扬子北缘的一套岛弧火山—碎屑岩建造, 并将整个大洪山地区前南华系厘定为中元古代稳定陆缘沉积(打鼓石群)、新元古代俯冲增生杂岩和活动大陆边缘岛弧火山岩—侵入岩 3 套物质组成(胡正祥等, 2017; 陈超等, 2017), 认为是晋宁期的缝合带, 而有别于董云鹏等(1998)提出的晚古生代—早中生代的缝合带。

本文对较为出名的杨家鹏蛇绿混杂岩中的安山岩(15YJP-1)和小阜街南东 3 km 处的硅质板岩(15DFS-2)进行了锆石 U-Pb 定年研究(图 1)。硅质板岩(15DFS-2)最年轻一组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 577.6 ± 4.9 Ma (MSWD = 0.27, $n = 4$), 说明硅质板岩的沉积时代应该是在 578 Ma 之后。而安山岩(15YJP-1)的锆石形态不一, 年龄也较分散, 多数应为岩浆上升过程中捕获围岩的锆石, 其最年轻一组 137.9 ± 1.8 Ma 的年龄应代表了该安山岩的最大形成年龄。胡正祥等(2017)报道的园潭

酸性火山岩(在样品 15DFS-2 附近, 图 1)的成岩年龄为 827.9 ± 5.9 Ma, 但是分析点中有 3 个谐和度较好的年轻锆石, 其范围为 134~431 Ma。综合上述定年结果, 我们认为花山构造混杂岩带可能不只是晋宁期的缝合带, 而是具有多期物质组成、经历了多期构造叠加的复合型缝合带。

研究区及周边另外几个值得注意的成果或地质背景是: (1)三里岗 947~858 Ma 的弧岩浆岩(Shi et al., 2007; Xu et al., 2016); (2)南秦岭地区 816~808 Ma 的 A 型花岗岩, 其在花山群的时限范围之内, 被认为产生于大陆裂谷盆地(Qiu et al., 2021); (3)南秦岭 780~720 Ma 的巨厚的武当群, 最大厚度大于 8 600 m(湖北省地质矿产局, 1996), 它们同样被认为是与 Rodinia 超大陆裂解有关的产物; (4)最新的研究表明, 桐柏—红安造山带存在早古生代的变质作用, 目前已做出的最早的榴辉岩的变质时间为 ca. 452 Ma(李乐倩和张宏福, 2021), 而主要的与陆陆碰撞有关的高压—超高压变质作用发生于三叠纪(Wu and Zheng, 2013; Liu et al., 2015; 董云鹏等, 2022)。

综合本文研究和区域上的成果, 我们目前认为的扬子与南秦岭的构造演化过程为: (1)950~830 Ma, 岛弧增生与陆—弧—陆拼贴阶段。新元古代早期, 南秦岭应是独立于扬子陆块的块体, 它们之间的洋板块向南俯冲, 形成三里岗岩浆弧(图 9a); 在 858~830 Ma 期间, 扬子陆块、三里岗岩浆弧与南秦岭地块拼贴形成统一块体(图 9b)。 (2)830~452 Ma, 大陆裂解、洋盆形成与陆陆碰撞。在 Rodinia 超大陆裂解的背景下, 扬子陆块内部形成半地堑盆地, 以花山群和莲沱组的沉积充填为代表; 在块体边缘, 扬子陆块与南秦岭地块裂离, 在它们之间沉积了巨厚的武当群。从本文定年的硅质板岩样品(15DFS-2)来看, 在 ca. 578 Ma, 扬子与南秦岭之间应该还存在洋盆(图 9c), ca. 452 Ma 的榴辉岩可能是南秦岭不断向北漂移与北秦岭碰撞的产物(图 9d), 扬子与南秦岭的真正碰撞发生在三叠纪。而本文定年的安山岩(15YJP-1), 应该是扬子与南秦岭碰撞结合后, 晚中生代(140~120 Ma)的陆内伸展、大规模的岩浆侵位和喷出形成的(Liu et al., 2015)。

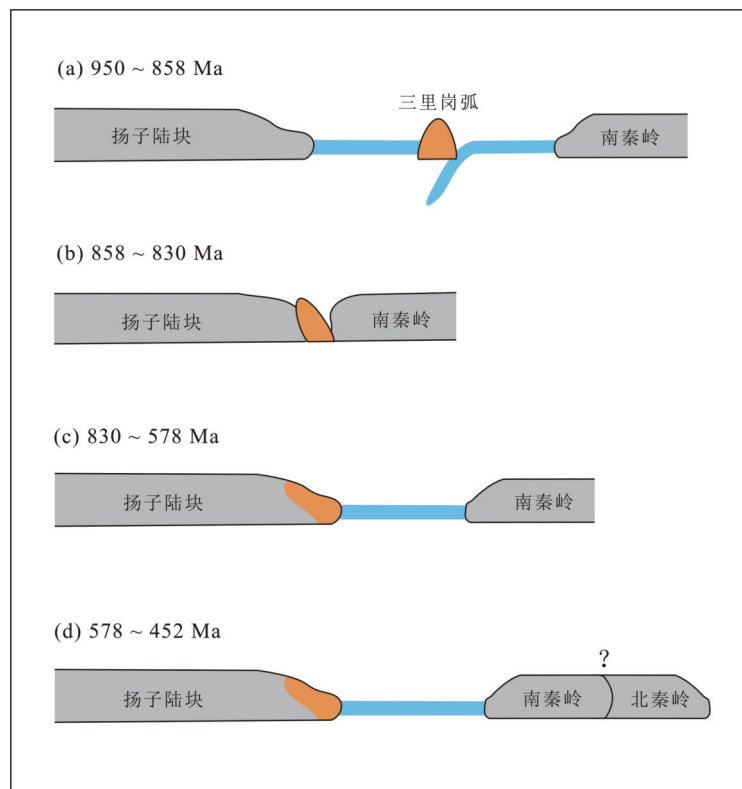


图 9 扬子陆块北缘新元古代—早古生代构造演化示意图

Fig. 9 Simplified cartoon model showing the evolution of the northern margin of the Yangtze Block during the Neoproterozoic to the Early Paleozoic

5 结论

(1)花山群形成于与 Rodinia 超大陆裂解有关的陆内裂谷盆地,其时限为 ca. 830~800 Ma。

(2)花山构造混杂岩带不只是晋宁期的缝合带,而是具有多期物质组成、经历了多期构造叠加的复合型缝合带。

(3)综合本文和区域上的成果,我们认为扬子陆块与南秦岭应在花山群沉积之前拼贴形成统一块体;ca. 830 Ma 之后,在 Rodinia 超大陆裂解的背景下,扬子陆块内部形成半地堑盆地,以花山群和莲沱组的沉积充填为代表,而在扬子陆块与南秦岭之间沉积了巨厚的武当群;直到 ca. 578 Ma,扬子与南秦岭之间还存在洋盆。而本文定年的杨家鹏安山岩,应该是扬子与南秦岭在三叠纪碰撞结合后,晚中生代陆内伸展的背景下形成的。

致谢: 感谢匿名审稿专家提出的建设性意见。

注释:

①湖北省地质调查院, 2003. 1: 25 万随州市幅区域地质调查报告 [R].

References

- Barth M G, McDonough W F, Rudnick R L, 2000. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust[J]. *Chemical Geology*, 165: 197 – 213.
- Chen C, Mao X W, Hu Z X, et al., 2017. Discovery of ~817 Ma oceanic island basalts in the Dahongshan region, northern Hubei Province and its significance[J]. *Geological Science and Technology Information*, 36 (6): 22 – 31 (in Chinese with English abstract).
- Chen C, Yuan J L, Kong L Y, et al., 2018. Documentation of Early Paleozoic magmatic dykes in the Dahongshan region, northern Yangtze block and its geological significance[J]. *Earth Science*, 43 (7): 2370 – 2388 (in Chinese with English abstract).
- Cui X Z, Jiang X S, Wang J, et al., 2014. Filling sequence and evolution model of the Neoproterozoic rift basin in central Yunnan Province, South China: Response to the breakup of Rodinia Supercontinent[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32 (3): 399 – 409 (in Chinese with English abstract).
- Deng Q, Wang J, Wang Z J, et al., 2013. Continental flood basalts of the Huashan Group, northern margin of the Yangtze block – implications for the breakup of Rodinia[J]. *International Geology Review*, 55 (15): 1865 – 1884.
- Deng Q, Wang J, Cui X Z, et al., 2016. The Type and Evolution of Neoproterozoic Sedimentary Basin in the Dahongshan Region, Northern Margin of the Yangtze Block: An Insight from Sedimentary Characteristics of the Huashan Group[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90 (5): 1917 – 1918.
- Deng Q, Wang J, Wang Z J, et al., 2016. Middle Neoproterozoic magmatic activities and their constraints on tectonic evolution of the Jiangnan Orogen[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40 (4): 753 – 771 (in Chinese with English abstract).
- Dong Y P, Zhang G W, Lai S C, et al., 1999. An ophiolitic tectonic melange first discovered in Huashan area, south margin of Qinling orogenic belt, and its tectonic implications[J]. *Science in China (Series D)*, 42 (3): 292 – 302.
- Dong Y P, Zhang G W, Zhao X, et al., 2004. Geochemistry of the subduction-related magmatic rocks in the Dahong Mountains, northern Hubei Province: constraint on the existence and subduction of the eastern Mianlue oceanic basin[J]. *Science in China (Series D)*, 47 (4): 366 – 377.
- Dong Y P, Zhang G W, Liu X M, et al., 1998. Disintegration of the Huashan Group in the Dahong Mountain area, northern Hubei[J]. *Regional Geology of China*, 17 (4): 371 – 376 (in Chinese with English abstract).
- Dong Y P, Hui B, Sun S S, et al., 2022. Multiple orogeny and geodynamics from Proto-Tethys to Paleo-Tethys of the Central China Orogenic Belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022245>.
- Du Q D, Wang Z J, Wang J, et al., 2013. Geochronology and paleoenvironment of the pre-Sturtian glacial strata: Evidence from the Liantuo Formation in the Nanhua rift basin of the Yangtze Block, South China[J]. *Precambrian Research*, 233: 118 – 131.
- Fitton J G, James D, Kempton P D, et al., 1988. The role of lithospheric mantle in the generation of late Cenozoic basic magmas in the western United States[J]. *Journal of Petrology*, Special Lithosphere Issue: 331–349.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hubei Province, 1996. *Stratigraphy (Lithostratic) of Hubei Province*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press.
- Hu Z X, Chen C, Mao X W, et al., 2015. Documentation of Jingningian island-arc volcanic rocks and accretionary complexes in the Dahongshan region, northern Hubei and its tectonic significance[J]. *Resources Environment and Engineering*, 29 (6): 757 – 766 (in Chinese with English abstract).
- Hu Z X, Chen C, Mao X W, et al., 2017. The Qingbaikouan Tumen Formation-complex island arc volcanic-clastic rocks on the northern margin of Yangtze block and its significance[J]. *Journal of Stratigraphy*, 41 (3): 304 – 317 (in Chinese with English abstract).
- Huang Y, Wang X L, Li J Y, et al., 2021. Early Neoproterozoic tectonic evolution of northern Yangtze Block: Insights from sedimentary sequences from the Dahongshan area[J]. *Precambrian Research*, 365: 106382.
- Jiang X S, Wang J, Cui X Z, et al., 2012. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of the Neoproterozoic Chengjiang Formation in central Yunnan Province (SW China) and its geological significance[J]. *Science China Earth Sciences*, 55 (11): 1815 – 1826.

- Jiang X S, Cui X Z, Zhuo J W, et al., 2020. New evidence for the opening time of the Neoproterozoic Kangdian rift basin, western Yangtze Block, South China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40 (3) : 31–37 (in Chinese with English abstract).
- Lan Z W, Li X H, Zhu M Y, et al., 2015. Revisiting the Liantuo Formation in Yangtze Block, South China: SIMS U-Pb zircon age constraints and regional and global significance[J]. *Precambrian Research*, 263: 123–141.
- Leat P T, Thompson M A, Hendry G L, et al., 1988. Compositionally-Diverse Miocene-Recent Rift-Related Magmatism in Northwest Colorado: Partial Melting, and Mixing of Mafic Magmas from 3 Different Asthenospheric and Lithospheric Mantle Sources[J]. *Journal of Petrology, Special Lithosphere Issue*: 351–377.
- Li L Q, Zhang H F, 2021. Discovery of Early Paleozoic high-pressure metamorphism of eclogite in Tongbai orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37 (12) : 3575–3590 (in Chinese with English abstract).
- Li K Z, Deng Q, Wang J, et al., 2020. Detrital zircon in the Huashan Group, northern Yangtze Block: Implications for the nature of Neoproterozoic sedimentary basins and Precambrian crustal evolution[J]. *Geological Journal*, 55 (12) : 8211–8224.
- Li K Z, Deng Q, Hou M C, et al., 2020. Geochronology and sedimentology of the Huashan Group in the northern Yangtze Block: implications for the initial breakup of the South China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 109: 2113–2131.
- Li X H, Li Z X, Zhou H W, et al., 2002. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of the Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: implications for the initial rifting of Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 113: 135–154.
- Li X H, Wang X C, Li W X, et al., 2008. Petrogenesis and tectonic significance of Neoproterozoic basaltic rocks in South China: From orogenesis to intracontinental rifting[J]. *Geochimica*, 37 (4) : 382–398 (in Chinese with English abstract).
- Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, et al., 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis[J]. *Precambrian Research*, 160: 179–210.
- Liu X C, Li S Z, Jahn B M, 2015. Tectonic evolution of the Tongbai-Hong'an orogen in central China: From oceanic subduction/accretion to continent-continent collision[J]. *Science China: Earth Sciences*, 58: 1477–1496.
- Liu S D, Zeng Z X, Guo R L, et al., 2021. Huashan Group in Northern Margin of Yangtze Block: A Suite of Back-Arc Basin Volcanic-Sedimentary Strata but Not Ophiolite Mélange[J]. *Earth Science*, 46 (8) : 2751–2767 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al., 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257 (1–2) : 34–43.
- Ling W L, Gao S, Zhang B R, et al., 2003. Neoproterozoic tectonic evolution of the northwestern Yangtze craton, South China: implications for amalgamation and break-up of the Rodinia Supercontinent[J]. *Precambrian Research*, 122: 111–140.
- Pearce J A, Norry M J, 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69: 33–47.
- Pfänder J A, Münker C, Stracke A, et al., 2007. Nb/Ta and Zr/Hf in ocean island basalts – Implications for crust-mantle differentiation and the fate of Niobium[J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 254: 158–172.
- Qiu X F, Ling W L, Liu X M, et al., 2011. Recognition of Grenvillian volcanic suite in the Shennongjia region and its tectonic significance for the South China Craton[J]. *Precambrian Research*, 191: 101–119.
- Qiu X F, Xu Q, Jiang T, et al., 2021. Petrogenesis and tectonic significance of the middle Neoproterozoic highly fractionated A-type granite in the South Qinling block[J]. *Geological Magazine*, 158: 1891–1910.
- Qiu Y S, Yang Q X, Deng Q, et al., 2017. Recognition and geological significance of basic volcanic rocks in Cretaceous Huashan Group, Dahongshan area[J]. *Resources Environment and Engineering*, 31 (2) : 123–130 (in Chinese with English abstract).
- Shervais J W, 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas[J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 59: 101–118.
- Shi Y R, Liu D Y, Zhang Z Q, et al., 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[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81 (2) : 239–243.
- Sun S S, McDonough W F, 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes [C]. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313–345.
- Tian H, Li H K, Zhou H Y, et al., 2017. Depositional age of the Huashan Group on the Northern Margin of the Yangtze Plate and its constraints on breakup of the Rodinia supercontinent[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91 (11) : 2387–2408 (in Chinese with English abstract).
- Wang J, Li Z X, 2003. History of Neoproterozoic rift basins in South China: implications for Rodinia break-up[J]. *Precambrian Research*, 122: 141–158.
- Wang X C, Li X H, Li W X, et al., 2007. Ca. 825 Ma komatiitic basalts in South China: first evidence for >1500°C mantle melts by a Rodinian mantle plume[J]. *Geology*, 35: 1103–1106.
- Wang X C, Li X H, Li W X, et al., 2008. The Bikou basalts in northwestern Yangtze Block, South China: remains of 820–810 Ma continental flood basalts[J]. *Geological Society of American Bulletin*, 120: 1478–1492.
- Wang X C, Li X H, Li W X, et al., 2009. Variable involvements of mantle plumes in the genesis of mid-Neoproterozoic basaltic rocks in South China: A review[J]. *Gondwana Research*, 15: 381–395.
- Wang X L, Shu L S, Xing G F, et al., 2012. Post-orogenic extension in the eastern part of the Jiangnan orogen: Evidence from ca 800–760 Ma volcanic rocks[J]. *Precambrian Research*, 222–223: 404–423.
- Wang Y J, Zhang A M, Cawood P A, et al., 2013. Geochronological, geochemical and Nd-Hf-Os isotopic fingerprinting of an early

- Neoproterozoic arc-back-arc system in South China and its accretionary assembly along the margin of Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 231: 343 – 371.
- Wang J, Zhou X L, Deng Q, et al., 2015. Sedimentary successions and the onset of the Neoproterozoic Jiangnan sub-basin in the Nanhua rift, South China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 104: 521 – 539.
- Weaver B L, 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 104: 381 – 397.
- Wu Y B, Zheng Y F, 2013. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu orogenic belt in central China[J]. *Gondwana Research*, 23: 1402 – 1428.
- Xu Y, Yang K G, Polat A, et al., 2016. The ~860 Ma mafic dikes and granitoids from the northern margin of the Yangtze Block, China: A record of oceanic subduction in the early Neoproterozoic[J]. *Precambrian Research*, 275: 310 – 331.
- Yang Z N, Yang K G, Polat A, et al., 2018. Early crustal evolution of the eastern Yangtze Block: Evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition of the Neoproterozoic Huashan Group in the Dahongshan area[J]. *Precambrian Research*, 309: 248 – 270.
- Zhang H J, Ye Q, Mao X W, et al., 2013. Sedimentary characteristics and tectonic-paleogeography significance of Huashan Group in Qingbaikou period of Dahong Mountain, Hubei[J]. *Resources Environment and Engineering*, 27 (6): 737 – 740 (in Chinese with English abstract).
- Zhao J H, Zhou M F, Yan D P, et al., 2011. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in South China: No connection with the Grenvillian orogeny[J]. *Geology*, 39 (4): 299 – 302.
- Zhao G C, 2015. Jiangnan Orogen in South China: Developing from divergent double subduction[J]. *Gondwana Research*, 27: 1173 – 1180.
- Zhao G C, Cawood P A, 2012. Precambrian geology of China [J]. *Precambrian Research*, 222-223: 13 – 54.
- Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B, et al., 2008. Rift melting of juvenile arc-derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China[J]. *Precambrian Research*, 163: 351 – 383.
- Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, et al., 2002a. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 51 – 67.
- Zhou M F, Kennedy A K, Sun M, et al., 2002b. Neoproterozoic Arc-Related Mafic Intrusions along the Northern Margin of South China: Implications for the Accretion of Rodinia[J]. *The Journal of Geology*, 110: 611 – 618.
- Zhou M F, Ma Y, Yan D P, et al., 2006. The Yanbian Terrane (Southern Sichuan Province, SW China): a Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*, 144: 19 – 38.
- Zhuo J W, Jiang X S, Wang J, et al., 2013. Opening time and filling pattern of the Neoproterozoic Kangdian Rift Basin, western Yangtze Continent, South China[J]. *Science China Earth Sciences*, 56 (10): 1664 – 1676.

附中文参考文献

- 陈超, 毛新武, 胡正祥, 等, 2017. 鄂北大洪山地区~817 Ma 洋岛玄武岩的发现及意义[J]. *地质科技情报*, 36 (6): 22 – 31.
- 陈超, 苑金玲, 孔令耀, 等, 2018. 扬子北缘大洪山地区早古生代基性岩脉的厘定及其地质意义[J]. *地球科学*, 43 (7): 2370 – 2388.
- 崔晓庄, 江新胜, 王剑, 等, 2014. 滇中新元古代裂谷盆地充填序列及演化模式: 对 Rodinia 超大陆裂解的响应[J]. *沉积学报*, 32 (3): 399 – 409.
- 邓奇, 王剑, 汪正江, 等, 2016. 江南造山带新元古代中期(830~750 Ma) 岩浆活动及对构造演化的制约[J]. *大地构造与成矿学*, 40 (4): 753 – 771.
- 董云鹏, 张国伟, 柳小明, 等, 1998. 鄂北大洪山地区“花山群”的解体中国区域地质[J]. *中国区域地质*, 17 (4): 371 – 376.
- 董云鹏, 惠博, 孙圣思, 等, 2022. 中国中央造山系原-古特提斯多阶段复合造山过程[J]. *地质学报*, <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022245>.
- 湖北省地质矿产局, 1996. 湖北省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 胡正祥, 陈超, 毛新武, 等, 2015. 鄂北大洪山晋宁期岛弧火山岩和增生杂岩的厘定及地质意义[J]. *资源环境与工程*, 29 (6): 757 – 766.
- 胡正祥, 陈超, 毛新武, 等, 2017. 扬子北缘青白口系土门岩组岛弧火山-碎屑岩的定义及意义[J]. *地层学杂志*, 41 (3): 304 – 317.
- 江新胜, 崔晓庄, 卓皆文, 等, 2020. 华南扬子陆块西缘新元古代康滇裂谷盆地开启时间新证据[J]. *沉积与特提斯地质*, 40 (3): 31 – 37.
- 李乐倩, 张宏福, 2021. 桐柏造山带榴辉岩早古生代高压变质作用的发现[J]. *岩石学报*, 37 (12): 3575 – 3590.
- 李献华, 王选策, 李武显, 等, 2008. 华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义: 从造山运动到陆内裂谷[J]. *地球化学*, 37 (4): 382 – 398.
- 刘述德, 曾佐勋, 郭瑞禄, 等, 2021. 扬子陆块北缘花山群: 弧后盆地火山-沉积岩系而非蛇绿混杂岩[J]. *地球科学*, 46 (8): 2751 – 2767.
- 邱艳生, 杨青雄, 邓奇, 等, 2017. 大洪山花山群中白垩纪基性火山岩的识别及其地质意义[J]. *资源环境与工程*, 31 (2): 123 – 130.
- 田辉, 李怀坤, 周红英, 等, 2017. 扬子板块北缘花山群沉积时代及其对 Rodinia 超大陆裂解的制约[J]. *地质学报*, 91 (11): 2387 – 2408.
- 张汉金, 叶琴, 毛新武, 等, 2013. 湖北省大洪山地区青白口纪花山群沉积特征及其构造古地理意义[J]. *资源环境与工程*, 27 (6): 737 – 740.