

滇西南大红山群变火山-沉积岩地球化学属性、 年代格架及其构造意义

姜杭云, 刘福来, 王 舫, 王慧宁, 李同宇

(中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘要: 云南新平地区大红山群出露于扬子地块西南缘, 主要由低绿片岩相-角闪岩相变质的火山-沉积岩组成。大红山群的岩石成因、年代格架及其形成的构造背景缺乏系统研究, 制约了地质学家们全面认识和理解扬子西南缘 <1.75 Ga 的构造演化历史。本文以大红山群底部老厂河组变沉积岩及其内部变火山岩夹层为重点研究对象, 开展岩相学、全岩地球化学和锆石 U-Pb 定年等综合研究。岩石地球化学研究结果表明, 变沉积岩的化学成分与大陆上地壳沉积物成分接近, 原岩为成熟度较高的泥岩/页岩, 未经历沉积再循环, 形成于被动大陆边缘的构造背景; 变火山岩原岩化学成分相当于钙碱性过铝质 A 型流纹岩, 形成于造山后的大陆裂谷拉张环境。锆石 U-Pb 定年结果显示, 老厂河组变沉积岩的碎屑锆石记录了 $2.3\sim 2.2$ Ga 和 $1.9\sim 1.75$ Ga 两个主年龄峰以及 $2.7\sim 2.6$ Ga 次年龄峰。结合前人研究结果, 表明大红山群物源主要来源于扬子地块西南缘的太古宙-古元古代基底岩石。变火山岩样品的岩浆锆石核部记录了 $1713\sim 1711$ Ma 的年龄, 应代表老厂河组原岩的形成时代, 锆石的变质增生边限定峰期变质时代为约 843 Ma。综合前人研究结果表明, 大红山群普遍经历了 $849\sim 837$ Ma 的新元古代变质事件。综上所述, 扬子地块西南缘的大红山群完好记录了与 Columbia 超大陆裂解有关的非造山岩浆活动, 新元古代变质事件可能与 Rodinia 超大陆裂解和聚合过程密切相关。

关键词: 扬子地块西南缘; 大红山群; 变火山-沉积岩; 锆石 U-Pb 定年; 地球化学

中图分类号: P588.3; P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)02-0393-34

Geochemistry, chronological framework and tectonic implications of metamorphic volcanic-sedimentary rocks from the Dahongshan Group in southwestern Yunnan Province

JIANG Hang-yun, LIU Fu-lai, WANG Fang, WANG Hui-ning and LI Tong-yu

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

Abstract: The Dahongshan Group in Xinping County, Yunnan Province, is located in the southwestern Yangtze Block. It mainly consists of volcanic-sedimentary rocks with lower greenschist-amphibolite facies. The lack of systematic research on the petrology, chronological framework and tectonic setting of the Dahongshan Group has hampered a comprehensive understanding of the tectonic evolution history in the southwestern Yangtze Block at <1.75 Ga. In this paper, meta-sedimentary rocks and intercalated meta-volcanic rocks from the Laochanghe Formation in the bottom of the Dahongshan Group were selected for an integrated study including petrographic observation, whole-rock geochemistry and zircon U-Pb dating. The geochemical data reveal that the meta-sedimentary rocks are chemically close to that of the upper crust sediments. The meta-sedimentary rocks are derived from mudstone/shale that

收稿日期: 2024-01-08; 接受日期: 2024-02-10; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金项目(91855206)

作者简介: 姜杭云(2000-), 女, 汉族, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: jianghangyun3324@163.com; 通讯作者: 刘福来(1963-), 博士, 研究员, 岩石学专业, E-mail: lfu0225@sina.com。

was formed in the tectonic setting of the passive continental margins with high maturity and low degree of sedimentary recirculation. Chemical compositions of the meta-volcanic protolith equates to a calc-alkaline peraluminous A-type rhyolite which formed in the post-orogenic continental rift environment. Zircon U-Pb age data show that the detrital zircons from meta-sedimentary rocks of the Laochanghe Formation document two main age peaks of 2.3~2.2 Ga and 1.9~1.75 Ga and a secondary age peak of 2.7~2.6 Ga. Combined with the previous studies, we proposed that the sources of the Dahongshan Group mainly from the Paleoproterozoic and Archean basement rocks in the southwestern Yangtze Block. The zircon cores of the meta-volcanic rocks define the protolith formation age of the Laochanghe Formation as 1 713~1 711 Ma. Zircon rims of the meta-volcanic rocks constrain the timing of peak metamorphism at 843±5 Ma. Combined with the previous and studies, we conclude that the Dahongshan Group underwent the Neoproterozoic metamorphic event of 849~837 Ma. In summary, the Dahongshan Group well preserved an anorogenic magmatism is related to Columbia supercontinent Cracking event in the southwestern Yangtze Block. The Neoproterozoic metamorphic event may be closely related to the assemblage and break-up of Rodinia supercontinent.

Key words: southwestern Yangtze Block; Dahongshan Group; metamorphic volcanic-sedimentary rocks; zircon U-Pb dating; geochemistry

Fund support: National Natural Science Foundation of China (91855206)

华南板块在前寒武纪超大陆所处位置的古地理重建是国内外地质学界关注的前沿和热点问题 (Zhao and Cawood, 1999; Zhao *et al.*, 2002; Pisarevsky and Natapov, 2003; Zhou *et al.*, 2006a; Li *et al.*, 2008a, 2008b)。华南板块由扬子地块和华夏地块拼合而成, 这些地块可能位于 Rodinia 和 Columbia 超大陆的内部、边缘或外部 (Roger and Santosh, 2002; Cawood *et al.*, 2013, 2018, 2020; Meredith *et al.*, 2017), 其形成和演化受 Columbia 和 Rodinia 超大陆聚合和裂解过程的影响 (郑永飞等, 2007; 李献华等, 2012; 王伟等, 2019)。扬子地块西南缘广泛出露古-中元古界结晶基底, 包括大红山群、河口群、东川群和原通安组等, 它们形成于超大陆裂解时期的陆内裂谷演化过程 (王伟等, 2019; 邓奇等, 2023)。前人研究认为扬子地块西南缘古-中元古代和新元古代岩浆-变质事件与 Columbia 和 Rodinia 超大陆聚合和裂解基本同步发生 (Zhao and Cawood, 2012; 尹福光等, 2012; 杨红等, 2012, 2013; Chen and Zhou, 2013; Zhou *et al.*, 2014; Wang and Zhou, 2014, Wang *et al.*, 2016)。大红山群作为扬子西南缘古-中元古界沉积地层, 其内变火山-沉积岩 (<~1.75 Ga) 所记录的岩浆-变质活动为深入探讨扬子地块前寒武纪形成演化及其与 Columbia 和 Rodinia 超大陆裂解的内在成因关联提供了关键地质证据。前人对大红山群变火山-沉积岩的同位素年龄、岩石地球化学以及构造属性等开展了相

关研究 (白瑾等, 1981; 钱锦和等, 1990; Hu *et al.*, 1991; 孙克祥等, 1993; 徐启东, 1998; Greentree and Li, 2008; Zhao, 2010; Zhao and Zhou, 2011; 杨红等, 2012, 2013, 2014; 金廷福等, 2017; 杨朝, 2023), 结果表明大红山群形成于古元古代晚期, 经历了新元古代变质事件 (Hu *et al.*, 1991; Greentree and Li, 2008; Zhao and Zhou, 2011; 杨红等, 2012, 2013; 金廷福等, 2017; 杨朝, 2023)。然而关于大红山群原岩成岩时代及其构造背景、变质年代格架等存在较多争议, 缺乏深入研究工作, 制约了地质学家们全面认识和理解扬子西南缘 <~1.75 Ga 的构造演化历史。精确限定大红山群变火山-沉积岩的原岩形成时代和变质时代、示踪大红山群的物质来源以及揭示大红山群的成岩环境与构造背景, 对于深入探讨扬子板块西南缘的前寒武纪构造演化过程及其与 Columbia 和 Rodinia 超大陆聚合和裂解过程的内在联系具有重要的科学意义。

围绕上述科学问题, 本文选取大红山群底部老厂河组变沉积岩和变火山岩夹层为研究对象, 开展岩石学、地球化学和同位素年代学等综合研究。在总结前人资料的基础上, 精确限定大红山群老厂河组变火山-沉积岩的形成时代和变质时代, 恢复变沉积岩的源区特征和物质来源, 本文通过研究大红山群变火山-沉积岩原岩的地球化学属性和形成构造背景, 为探讨扬子地块西南缘前寒武纪构造演化提供重要依据。

1 区域地质背景

大红山群主要出露于扬子地块西南缘,哀牢山-红河构造剪切带北端(图 1a、1b),是已知康滇地区最古老的地层单元之一。大红山群主要分布于云南

新平县大红山-腰街-漠沙农场和元江县的青龙、撮科一带,出露规模达 120 km²。大红山群普遍经历了新元古代变质事件(曹德斌, 1997; Zhou *et al.*, 2014),主体是一套变质火山-沉积岩系,由变砾岩、白云母片岩、角闪岩、大理岩和石英岩组成(钱锦和等, 1990),变质程度达绿片岩相-低角闪岩相。

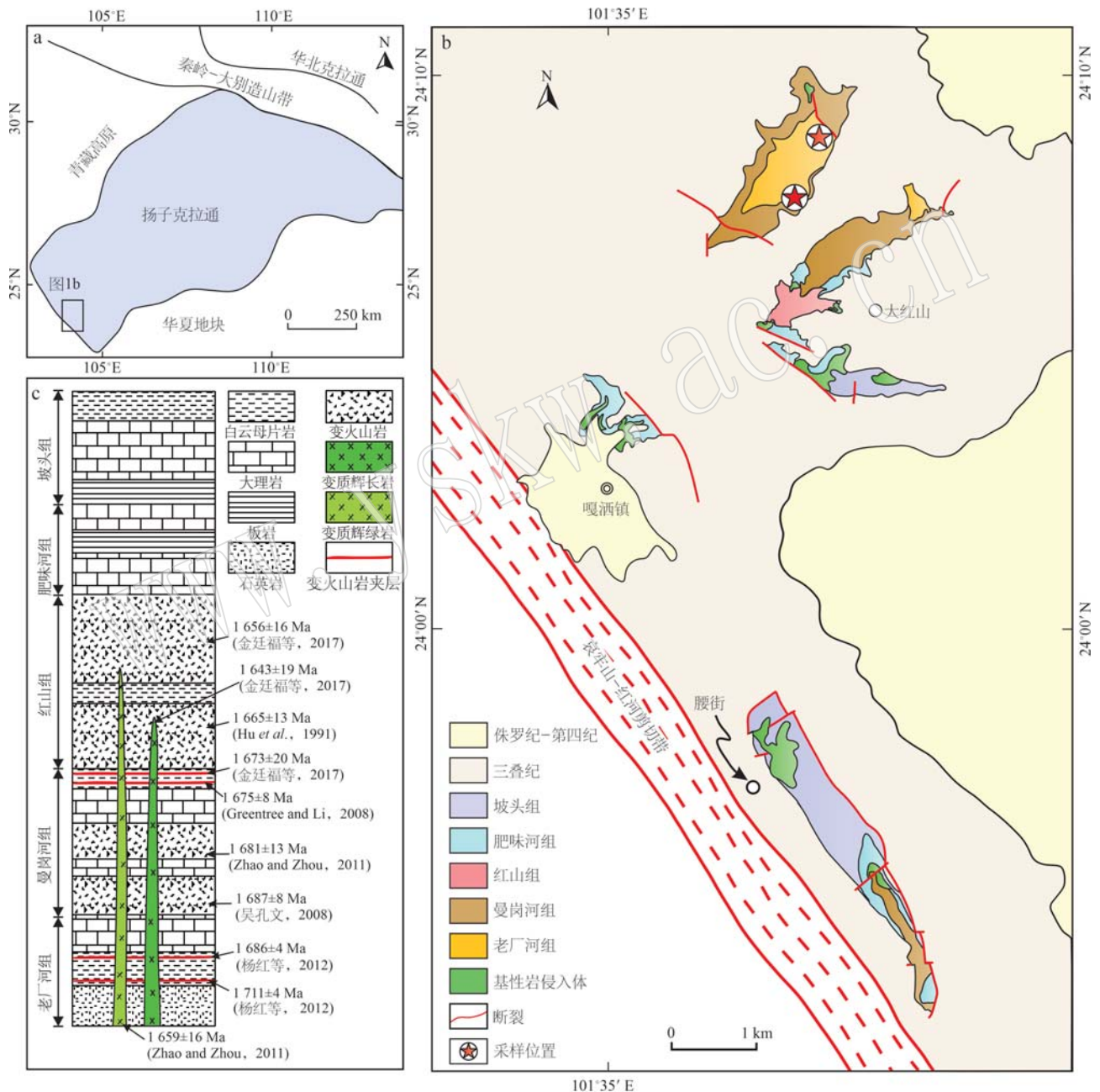


图 1 华南板块大地构造简图(a)、滇西区域地质简图及采样位置(b)和大红山群地层柱状图(c)(钱锦和等, 1990; Greentree and Li, 2008; 修改自 Zhao, 2010; Zhao and Zhou, 2011; 杨红等, 2012)

Fig. 1 Tectonic framework of South China Block (a), simplified geological map of western Yunnan and the star represents the sampling location (b), stratigraphic column of the Dahongshan Group(c) (modified from Qian Jinhe *et al.*, 1990; Greentree and Li, 2008; Zhao, 2010; Zhao and Zhou, 2011; Yang Hong *et al.*, 2012)

大红山群变火山岩的地球化学研究表明原岩构造环境接近于大陆裂谷,岩浆来源于不均匀岩石地幔(刘肇昌等, 1995; 徐启东, 1998; 张鸿翔等, 2001; 杨红等, 2014; 戚金栋, 2016)。大红山群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(图 1c), 各地层之间呈整合接触, 总厚度 2 908 m。老厂河组由变质碎屑岩-白云母片岩-大理岩组成, 原岩为砂砾岩、砂岩-泥质岩-石灰岩, 属陆源碎屑的滨海-浅海相海进序列。通过对老厂河组变火山岩开展锆石 U-Pb 定年, 限定了老厂河组的原岩形成时代为 1 711 ~ 1 686 Ma (杨红等, 2012), 锆石 U-Pb 和白云母 Ar-Ar 法限定老厂河组的变质时代为 856 ~ 837 Ma (Greentree, 2007; 杨红等, 2012, 2013), 二云母片岩的独居石 U-Pb 年龄限定老厂河组的变质时代为 845 ± 6 Ma (杨朝, 2023); 曼岗河组为一套深海相海底火山喷发沉积建造, 发育中基性钠质火山岩, 铁铜矿呈条带状夹层。曼岗河组变火山岩的锆石 U-Pb 年龄限定其火山喷发时代为 1 687 ~ 1 675 Ma (Hu *et al.*, 1991; 吴孔文, 2008; Greentree and Li, 2008; Zhao and Zhou, 2011); 红山组岩性以细碧-角斑岩(火山熔岩)为代表。下部以浅灰色变钠质熔岩(角斑岩)为主, 中部为绿色片岩, 产条带状铁铜矿体, 上部为暗绿色变角闪钠质熔岩(细碧岩), 红山组变火山岩的锆石 U-Pb 年龄为 1 673 ~ 1 643 Ma (Hu *et al.*, 1991; 金廷福等, 2017), 侵入红山组的变质辉长岩的变质锆石 U-Pb 年龄限定其变质时代为 748.9 ± 5.7 Ma (金廷福等, 2017); 肥味河组总体是变质碳酸盐岩建造, 以白色块状白云石大理岩为特征, 大理岩底部发育火山碎屑岩及钠质火山岩透镜体, 上部发育夹层状含黄铁矿炭质板岩; 坡头组为一套浅变质含炭质、砂泥质及碳酸盐岩沉积建造, 具有复理石特征。

2 大红山群变火山-沉积岩的岩石学特征

大红山群老厂河组广泛出露变沉积岩, 局部发育变火山岩, 可见变火山岩呈夹层状产于变沉积岩之中(图 2d)。变火山岩和变沉积岩样品采自云南省玉溪市老厂乡干河沟处。本文选取 3 件变火山岩样品(石榴长石石英片岩 21DHS02-3、21DHS06-3 和 21DHS06-3a), 7 件变沉积岩样品(石榴白云母片岩 21DHS06-4、21DHS06-5、21DHS06-6、21DHS06-4a、

21DHS06-5a、21DHS06-6a 和石榴黑云大理岩 21DHS04-3)开展岩石学、全岩地球化学和锆石年代学研究。详细的岩相学观察表明, 变火山岩和变沉积岩(石榴白云母片岩)的结构构造和矿物成分相似, 但是两类岩石的矿物组成与含量和石榴子石产状存在明显区别。变火山岩矿物组成以石英、长石为主, 云母含量低, 石榴子石呈不规则集合体, 自形程度较差; 变沉积岩以白云母和石榴子石为主, 长英质矿物相对较少, 石榴子石为中粗粒自形晶。代表性变沉积岩和变火山岩的显微结构特征分述如下:

2.1 变沉积岩

2.1.1 石榴黑云大理岩

石榴黑云大理岩(21DHS04-3)呈层状产出, 定向性明显, 可见变基性岩与大理岩呈侵入接触关系(图 2a)。石榴黑云大理岩主要由碳酸盐矿物(~65%)和石英(~12%)组成, 含少量黑云母(~8%)、绿泥石(~8%)、石榴子石(~5%)和暗色矿物(<5%)。斑状变晶结构, 变斑晶为石榴子石, 基质以碳酸盐矿物和石英为主。石榴子石为中粗粒(1.0~2.5 mm)半自形变斑晶, 普遍被绿泥石交代呈网脉状。碳酸盐矿物呈细粒自形-半自形晶(0.5~0.8 mm), 均匀分布, 与石英和黑云母组成三联点结构。石英呈他形细粒均匀分布(0.1~0.2 mm), 局部可见石英呈极细粒包裹体形式产于石榴子石中。绿泥石呈他形不规则状, 以黑云母的退变矿物形式分布于石榴子石的裂纹处。黄铜矿呈他形不规则状充填在碳酸盐矿物颗粒之间。

2.1.2 石榴白云母片岩

石榴白云母片岩(21DHS06-5, 图 3)主要由白云母(~40%)、石英(~25%)、石榴子石(~20%)和黑云母(~10%)组成, 含少量长石(<5%)、电气石(<5%)和暗色矿物(<5%)。斑状变晶结构, 变斑晶为石榴子石, 基质以白云母和石英为主, 含少量黑云母和长石。石榴子石为中粗粒(1~4 mm)自形变斑晶, 顺面理两侧发育石英和黑云母压力影。石榴子石具明显的核边结构, 核部包裹大量的细小矿物包体, 边部较干净。白云母、石英和黑云母呈长条带状连续定向分布构成主期片理。

2.2 变火山岩

变火山岩的岩性为石榴长石石英片岩(图 4), 矿物组成为石英(~50%)、长石(~20%)、石榴子石(~12%)和白云母(~10%), 含少量黑云母(<5%)、碳酸盐矿物(<5%)、绿泥石(<5%)、暗色矿物

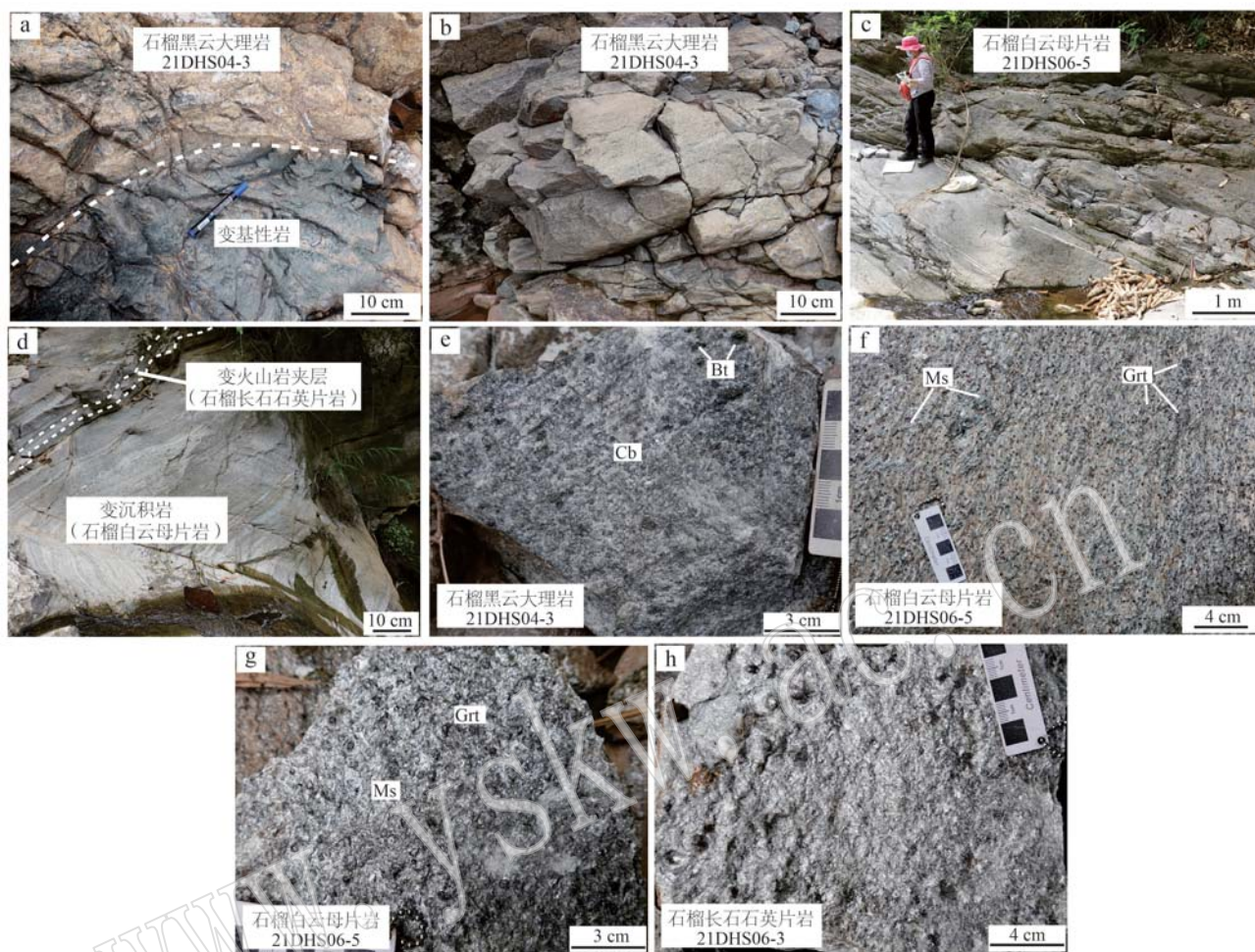


图2 大红山群老厂河组变火山-沉积岩野外露头 and 手标本照片

Fig. 2 Representative photographs show the outcrops and hand specimen of meta-sedimentary and meta-volcanic rocks from the Laochanghe Formation, Dahongshan Group

(<5%)。斑状变晶结构,变斑晶为石榴子石,基质由石英、长石和黑云母组成。石榴子石呈不规则集合体形式分布于石英和长石粒间,部分可见较粗粒的半自形石榴子石。石英呈细粒他形颗粒(0.1~0.4 mm),基质中的石英和长石、云母定向分布共同构成岩石的主期片理。长石他形细粒(0.2~0.4 mm),普遍发生绢云母化。与石英、云母接触平直。白云母呈大颗粒片状(0.7 mm×0.1 mm~1.5 mm×0.25 mm),定向分布于基质中。

3 分析测试方法

3.1 全岩主量和稀土、微量元素

在河北省区域地质矿产调查研究制备大红山群变火山岩和变沉积岩的全岩粉末(200目),广州澳

实分析检测实验室分析测试全岩主量和微量元素。主量元素测定采用X射线荧光光谱仪(XRF,型号PANalytical PW2424),微量及稀土元素采用ICP-AES(型号为Agilent VISTA)和ICP-MS(型号为Agilent 7700×)测试完成。主微量元素分别执行GB/T 14506.28-2010和GB/T 14506.30-2010标准。本文矿物代号参照沈其韩(2009)。

3.2 锆石 U-Pb 定年

在河北省廊坊宇能岩石矿物分选实验室完成大红山群变沉积岩和变火山岩的锆石分选。首先将每件样品破碎至粒级,清洗、烘干和筛选,采用强磁选分离技术分选出不同粒级的锆石晶体,在双目镜下挑选出颗粒相对完整的锆石晶体约300粒。锆石制靶后,进行锆石阴极发光(CL)和背散射(BSE)照相,以观察其晶体形貌和内部结构。

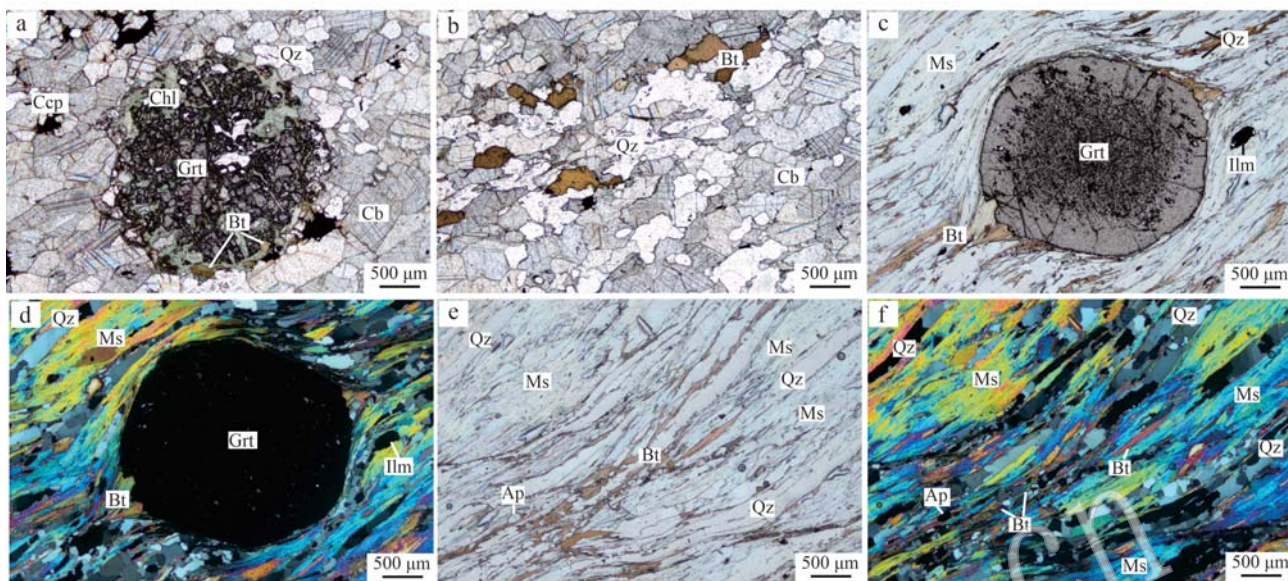


图 3 大红山群老厂河组变沉积岩(石榴黑云大理岩和石榴白云母片岩)显微结构照片

Fig. 3 Photomicrographs displaying characteristic features of meta-sedimentary rocks (garnet-biotite marble and garnet-muscovite schist) from the Laochanghe Formation, Dahongshan Group

a—石榴黑云大理岩矿物组成为碳酸盐矿物(Cb)+石英(Qtz)+黑云母(Bt)+石榴子石(Grt)+绿泥石(Chl)+黄铜矿(Ccp), 单偏光; b—石榴黑云大理岩基质矿物组合为碳酸盐矿物(Cb)+石英(Qtz)+黑云母(Bt)+黄铜矿(Ccp), 单偏光; c、d—石榴白云母片岩矿物定向排列, 主要矿物组成白云母(Ms)+石英(Qtz)+黑云母(Bt)+石榴子石(Grt)+钛铁矿(ilm), 石榴子石顺节理两侧发育压力影构造, c 单偏光, d 正交偏光; e、f—石榴白云母片岩基质白云母(Ms)、石英(Qtz)和黑云母(Bt)定向构成主期片理, e 单偏光, f 正交偏光

a—garnet-biotite marble with main assemblages of carbonate minerals (Cb)+quartz (Qtz)+biotite (Bt)+garnet (Grt)+chlorite (Chl)+chalcopyrite (Ccp), plane-polarized light; b—the matrix minerals of carbonate minerals (Cb)+quartz (Qtz)+biotite (Bt)+chalcopyrite (Ccp) in garnet-biotite marble, plane-polarized light; c, d—garnet-muscovite schist contains oriented minerals including muscovite (Ms)+quartz (Qtz)+biotite (Bt)+garnet (Grt)+ilmenite (Ilm) and displays pressure shadow structure on both sides of garnets, plane-polarized light for c, crossed-polarized light for d; e, f—garnet-muscovite schist contains oriented matrix minerals of muscovite (Ms), quartz (Qtz) and biotite (Bt) that define the main foliation, plane-polarized light for e, crossed-polarized light for f

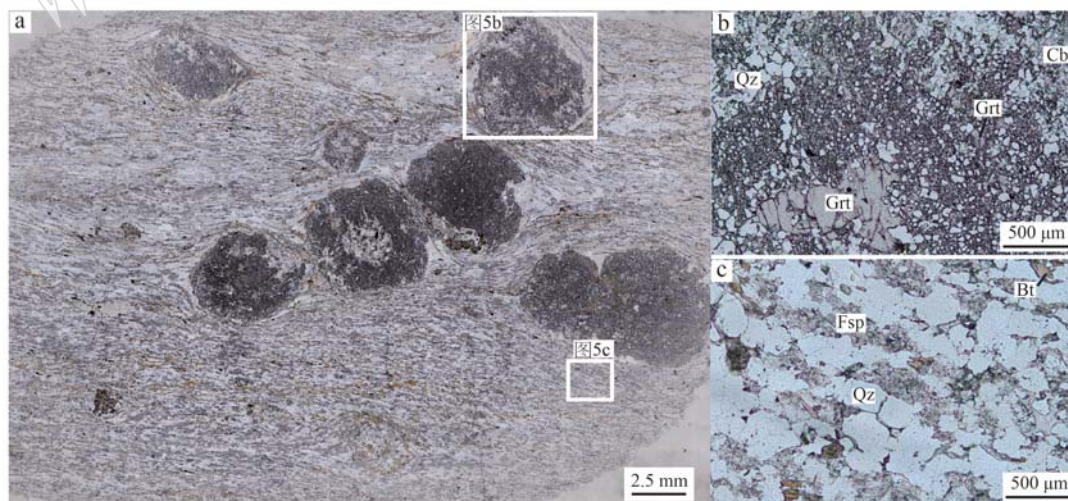


图 4 大红山群老厂河组变火山岩(石榴长石英片岩)显微结构照片(单偏光)

Fig. 4 Photomicrographs showing petrographic characteristics of meta-volcanic rocks (garnet-feldspar-quartz schist) from the Laochanghe Formation, Dahongshan Group (plane-polarized light)

a—斑状变晶结构, 变斑晶为石榴子石, 基质主要由石英、长石和黑云母组成; b—不规则集合体石榴子石和较粗粒半自形石榴子石; c—基质主要矿物组合为长石(Fsp)+石英(Qtz)+黑云母(Bt)+碳酸盐矿物(Cb)

a—the garnet-feldspar-quartz schist contains porphyroblast of garnet and matrix minerals of quartz, feldspar and biotite with porphyroblastic texture; b—irregular assemblages and coarser subhedral garnet grains; c—the main matrix minerals of feldspar (Fsp)+quartz (Qtz)+biotite (Bt)+carbonate mineral (Cb) in garnet-feldspar-quartz schist

3.2.1 LA-ICP-MS U-Pb 锆石年代学

大红山群变沉积岩碎屑锆石的 U-Pb 定年在北京铅年领航科技有限公司完成。采用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)。激光剥蚀采用 NWR193UC 型 193 nm 深紫外激光剥蚀进样系统(Elemental Scientific Lasers LLC)。质谱仪采用 Agilent 7900 型电感耦合等离子体质谱仪(Agilent)。锆石样品固定在环氧树脂靶上,抛光后在超纯水中超声清洗,分析前用分析级甲醇擦拭样品表面。采用 5 个激光脉冲对每个剥蚀区域进行预剥蚀(剥蚀深度 $\sim 0.3\ \mu\text{m}$),以去除样品表面可能的污染。束斑直径 $30\ \mu\text{m}$ 、剥蚀频率 6 Hz、能量密度 $\sim 5\ \text{J}/\text{cm}^2$ 的激光条件下分析样品。数据处理采用 Iolite 程序(Paton *et al.*, 2010),锆石 GJ-1 作为校正标样,91500 作为监测标样,每隔 10 个样品点分析 2 个 GJ-1、2 个 91500、2 个 Plesovice 和 1 个 NIST610。通常采集 25 s 的气体空白,45 s 的信号区间进行数据处理,按指数方程进行深度分馏校正(Paton *et al.*, 2010)。以 NIST 610 作为外标, ^{91}Zr 作为内标计算微量元素含量。碎屑锆石的 U-Pb 谐和年龄图、加权平均年龄

和年龄分布直方图使用 Isoplot 软件。

3.2.2 SHRIMP U-Pb 锆石年代学

由中国地质科学院北京离子探针中心 SHRIMP II 完成大红山群变火山岩的锆石 U-Pb 定年。具体的流程参考 Williams(1998)。一次流 O^{2-} 强度为 3~5 nA,束斑直径 25~30 μm 。锆石的 U 含量和年龄校正的标样为 M257($U = 840 \times 10^{-6}$, Nasdala *et al.*, 2008) 和 TEM ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 417 Ma, Black *et al.*, 2003)。采用 SQUID 和 ISOPLLOT 程序(Ludwig, 2003) 进行数据处理,实测 ^{204}Pb 含量进行普通铅校正,同位素比值和单点年龄误差为 1σ 。

4 大红山群变火山-沉积岩的地球化学特征

选择 9 件大红山群老厂河组变沉积岩(石榴白云母片岩)和变火山岩(石榴长石石英片岩)的代表性样品进行全岩主微量元素分析,详细数据见表 1。研究发现变沉积岩和变火山岩样品的全岩化学成分差异明显(图 5),其地球化学特征分述如下:

表 1 大红山群变火山-沉积岩主量元素($w_B/\%$)、稀土和微量元素($w_B/10^{-6}$)组成

Table 1 Major ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) compositions of meta-volcanic and meta-sedimentary rocks from the Dahongshan Group

岩性	石榴白云母片岩(变沉积岩)						石榴长石石英片岩(变火山岩)		
样品号	21DHS06-4	21DHS06-5	21DHS06-6	21DHS06-4a	21DHS06-5a	21DHS06-6a	21DHS02-3	21DHS06-3	21DHS06-3a
SiO_2	66.26	59.10	59.20	60.44	60.72	59.83	75.92	76.37	77.02
TiO_2	0.58	0.68	0.71	0.72	0.71	0.72	0.21	0.19	0.19
Al_2O_3	16.98	20.92	19.60	20.56	21.06	20.53	11.21	11.18	11.11
Fe_2O_3	0.67	0.73	0.79	0.68	0.30	0.40	0.18	0.22	0.33
FeO	6.21	7.16	8.95	5.43	5.16	7.12	3.04	3.07	2.64
MnO	0.14	0.08	0.08	0.04	0.04	0.07	0.07	0.06	0.06
MgO	1.31	1.86	2.58	1.95	1.96	2.37	0.81	0.83	0.79
CaO	0.95	1.11	0.74	0.62	0.64	0.81	1.59	1.60	1.51
Na_2O	0.49	0.83	0.60	0.78	0.88	0.72	2.22	2.19	2.19
K_2O	3.84	4.76	3.52	4.99	5.24	4.10	1.72	1.70	1.81
P_2O_5	0.10	0.13	0.14	0.14	0.13	0.14	0.01	0.01	0.01
LOI	2.04	2.42	2.10	2.79	2.80	2.37	2.08	2.19	2.27
$t_{\text{Zr}}/^\circ\text{C}$	—	—	—	—	—	—	906	903	908
$\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$	7.57	8.69	10.74	6.71	6.03	8.31	3.56	3.63	3.26
CIA	72.42	71.73	77.10	73.28	72.49	75.18	57.19	57.28	57.26
ICV	0.65	0.68	0.70	0.67	0.67	0.68	2.97	2.99	2.88
$\log(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}/\text{K}_2\text{O})$	0.29	0.26	0.48	0.13	0.06	0.31	—	—	—
$\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$	0.59	0.45	0.48	0.47	0.46	0.46	—	—	—
$100 \times \text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	3.42	3.25	3.62	3.50	3.37	3.51	1.87	1.70	1.71
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$	29.28	30.76	27.61	28.56	29.66	28.51	53.38	58.84	58.47
$100 \times \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}/\text{Al}_2\text{O}_3$	44.58	41.54	54.80	32.64	28.63	40.48	31.76	32.47	29.34
$100 \times \text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$	7.66	7.83	6.61	10.73	11.77	8.66	5.90	5.23	5.83

续表 1
Continued Table 1

岩性	石榴白云母片岩(变沉积岩)						石榴长石石英片岩(变火山岩)		
样品号	21DHS06-4	21DHS06-5	21DHS06-6	21DHS06-4a	21DHS06-5a	21DHS06-6a	21DHS02-3	21DHS06-3	21DHS06-3a
$\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}/(\text{MgO}+\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}})$	—	—	—	—	—	—	0.81	0.81	0.80
A/CNK	—	—	—	—	—	—	1.33	1.34	1.33
$\text{Mg}^{\#}$	—	—	—	—	—	—	32.37	32.69	34.96
Cr	110	130	130	140	140	130	<10	<10	<10
Co	23.7	22.1	27.1	16.7	20.2	26.0	6.3	6.6	7.6
Ni	37.0	48.6	50.1	47.4	50.1	51.7	3.0	2.3	2.3
Rb	164.5	215.0	170.0	224.0	244.0	189.5	88.5	87.4	90.1
Sr	17.9	23.7	32.0	24.3	25.7	33.8	21.6	20.1	18.8
Ba	592	764	523	796	839	628	246	233	248
Cs	2.34	3.72	2.49	3.41	4.03	2.70	1.23	1.19	1.07
V	162	150	136	159	162	137	<5	<5	<5
Ta	0.9	0.8	0.9	1.0	1.0	0.8	3.8	4.4	4.5
Nb	16.1	12.6	12.7	13.6	13.1	12.2	67.3	66.7	69.7
Zr	133	115	137	121	120	121	394	381	398
Hf	3.7	3.2	3.7	3.7	3.8	3.3	12.3	12.2	12.8
Th	16.30	26.60	23.40	17.85	20.70	20.30	33.40	31.90	34.30
U	2.24	3.34	3.47	1.82	2.08	2.76	5.83	5.64	5.79
Y	37.7	35.0	47.0	22.6	19.8	32.5	96.6	97.2	92.5
La	76.0	109.5	183.0	53.1	53.9	130.5	145.6	143.5	118.5
Ce	148.5	215.0	348.0	95.1	98.0	251.0	293.0	301.0	246.0
Pr	16.45	23.50	37.70	11.45	11.75	27.50	35.30	34.90	29.00
Nd	60.0	85.7	136.5	41.3	41.7	99.0	135.4	136.0	111.5
Sm	10.75	14.35	23.50	7.38	7.09	16.90	26.90	27.10	23.10
Eu	1.79	2.33	3.67	1.36	1.38	2.79	3.58	3.65	3.11
Gd	8.30	9.74	16.25	5.72	5.40	11.30	21.80	22.10	20.30
Tb	1.19	1.27	2.11	0.79	0.73	1.49	3.22	3.15	3.03
Dy	6.57	6.65	10.40	4.26	3.78	7.02	18.36	18.25	17.60
Ho	1.27	1.23	1.79	0.81	0.71	1.23	3.54	3.55	3.43
Er	3.41	3.40	4.66	2.23	1.95	3.31	9.77	9.86	9.87
Tm	0.50	0.49	0.65	0.34	0.28	0.43	1.46	1.43	1.39
Yb	3.16	2.96	3.98	1.89	1.63	2.53	8.97	8.95	8.62
Lu	0.46	0.45	0.54	0.28	0.24	0.36	1.38	1.36	1.27
Ga	24.4	30.3	27.9	32.3	33.0	32.3	21.9	22.3	22.1
ΣREE	338.35	476.57	772.75	226.01	228.54	555.36	708.28	714.80	596.72
δCe	0.97	0.97	0.96	0.89	0.90	0.96	0.96	0.99	0.98
δEu	0.56	0.57	0.54	0.62	0.66	0.58	0.44	0.44	0.43
$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	16.21	24.94	31.00	18.94	22.29	34.78	10.94	10.81	9.27
$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$	4.45	4.80	4.90	4.53	4.78	4.86	3.40	3.33	3.23
$(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$	2.12	2.66	3.29	2.44	2.67	3.60	1.96	1.99	1.90
Nb/La	0.21	0.12	0.07	0.26	0.24	0.09	0.46	0.46	0.59
$(\text{al}+\text{fm})-(\text{c}+\text{alk})$	63.64	62.33	73.32	62.70	60.57	67.96	36.08	36.59	35.23
LREE	313.49	450.38	732.37	209.69	213.82	527.69	639.78	646.15	531.21
HREE	24.86	26.19	40.38	16.32	14.72	27.67	68.50	68.65	65.51
LREE/HREE	12.61	17.20	18.14	12.85	14.53	19.07	9.34	9.41	8.11
Rb/Sr	—	—	—	—	—	—	4.10	4.35	4.79
Nb/Ta	—	—	—	—	—	—	17.71	15.16	15.49
$10000\text{Ga}/\text{Al}$	—	—	—	—	—	—	3.69	3.77	3.76
$\text{Zr}+\text{Ce}+\text{Nb}+\text{Y}$	—	—	—	—	—	—	850.9	845.9	806.2

注: CIA = $[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100$ ($x_{\text{B}}/\%$), $\text{CaO}^* = \text{CaO} - 3.33 \times \text{P}_2\text{O}_5 - \text{CO}_2$ ($x_{\text{B}}/\%$) (Nesbitt and Young, 1982); ICV = $(\text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3$ (Cox *et al.*, 1995); t_{Zr} ($^{\circ}\text{C}$) 计算方法据 Watson and Harrison (1983); al = $(\text{Al}_2\text{O}_3/102 \times 1000) \times 100/\Sigma$, fm = $(\text{FeO}/72 + \text{Fe}_2\text{O}_3/160 \times 2 + \text{MgO}/40 + \text{MnO}/71) \times 1000 \times 100/\Sigma$, c = $(\text{CaO}/56 \times 1000) \times 100/\Sigma$, alk = $(\text{Na}_2\text{O}/62 + \text{K}_2\text{O}/94) \times 1000 \times 100/\Sigma$, Si = $(\text{SiO}_2/60 \times 1000) \times 100/\Sigma$, $\Sigma = (\text{Al}_2\text{O}_3/102 + \text{FeO}/72 + \text{Fe}_2\text{O}_3/160 \times 2 + \text{MgO}/40 + \text{MnO}/71 + \text{CaO}/56 + \text{Na}_2\text{O}/62 + \text{K}_2\text{O}/94) \times 1000$.

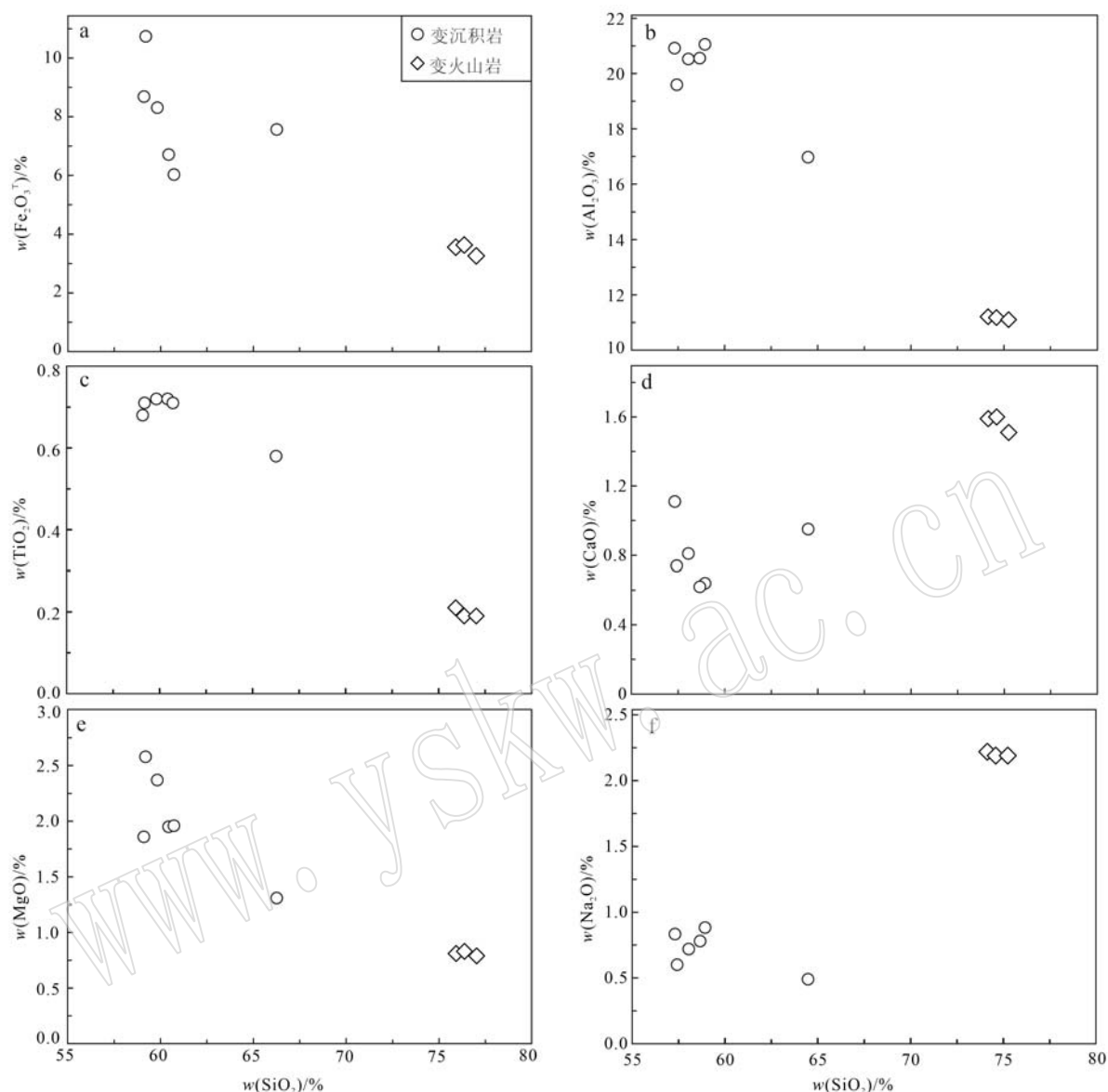


图5 大红山群老厂河组变火山-沉积岩主量元素哈克图解

Fig. 5 Harker diagrams of major elements of meta-sedimentary rocks and meta-volcanic rocks from the Laochanghe Formation, Dahongshan Group

4.1 主量元素特征

4.1.1 变沉积岩

变沉积岩 SiO_2 含量为 59.10% ~ 66.26%, 具有较低的 Na_2O (0.49% ~ 0.88%)、 CaO (0.62% ~ 1.11%)、 TiO_2 (0.58% ~ 0.72%) 和较高的 Al_2O_3 (16.98% ~ 21.06%)、 K_2O (3.52% ~ 5.24%)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ (6.03% ~ 10.74%)、 MgO (1.31% ~ 2.58%) 含量。在 (al+fm) - (c+alk) - Si 原岩恢复图解中 (Simonen, 1953), 样品投影点均落入泥质沉积岩和砂质沉积岩过渡区域 (图 6a)。 $\log(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}/\text{K}_2\text{O}) - \log(\text{SiO}_2/$

$\text{Al}_2\text{O}_3)$ - 判别图显示变沉积岩统一落在页岩区域 (图 6b), 表明变沉积岩的化学成分整体与页岩相似, 原岩类型为泥岩或页岩。

4.1.2 变火山岩

变火山岩的化学成分与酸性火山岩相似。与变沉积岩的化学成分相比, 变火山岩具较高的 SiO_2 (75.92% ~ 77.02%)、 Na_2O (2.19% ~ 2.22%)、 CaO (1.51% ~ 1.60%) 和较低的 Al_2O_3 (11.11% ~ 11.21%)、 K_2O (1.70% ~ 1.81%)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ (3.26% ~ 3.63%)、 TiO_2 (0.19% ~ 0.21%)、 MgO (0.79% ~

0.83%)含量。 $Mg^{\#}$ 值为32.37~34.96,平均33.34,铝饱和指数(A/CNK)=1.33~1.34>1.0,属于过铝质岩石。 $10000Ga/Al=3.69\sim3.77$, $Fe_2O_3^T/(MgO+Fe_2O_3^T)=0.81$ 。在 $Nb/Y-Zr/TiO_2$ 判别图解中(图

6c),变火山岩的原岩成分对应于流纹岩。全碱含量(alk)为3.89%~4.00%,属于钙碱性系列岩石(图6d)。因此,变火山岩属于钙碱性酸性火山岩,原岩化学成分相当于过铝质流纹岩。

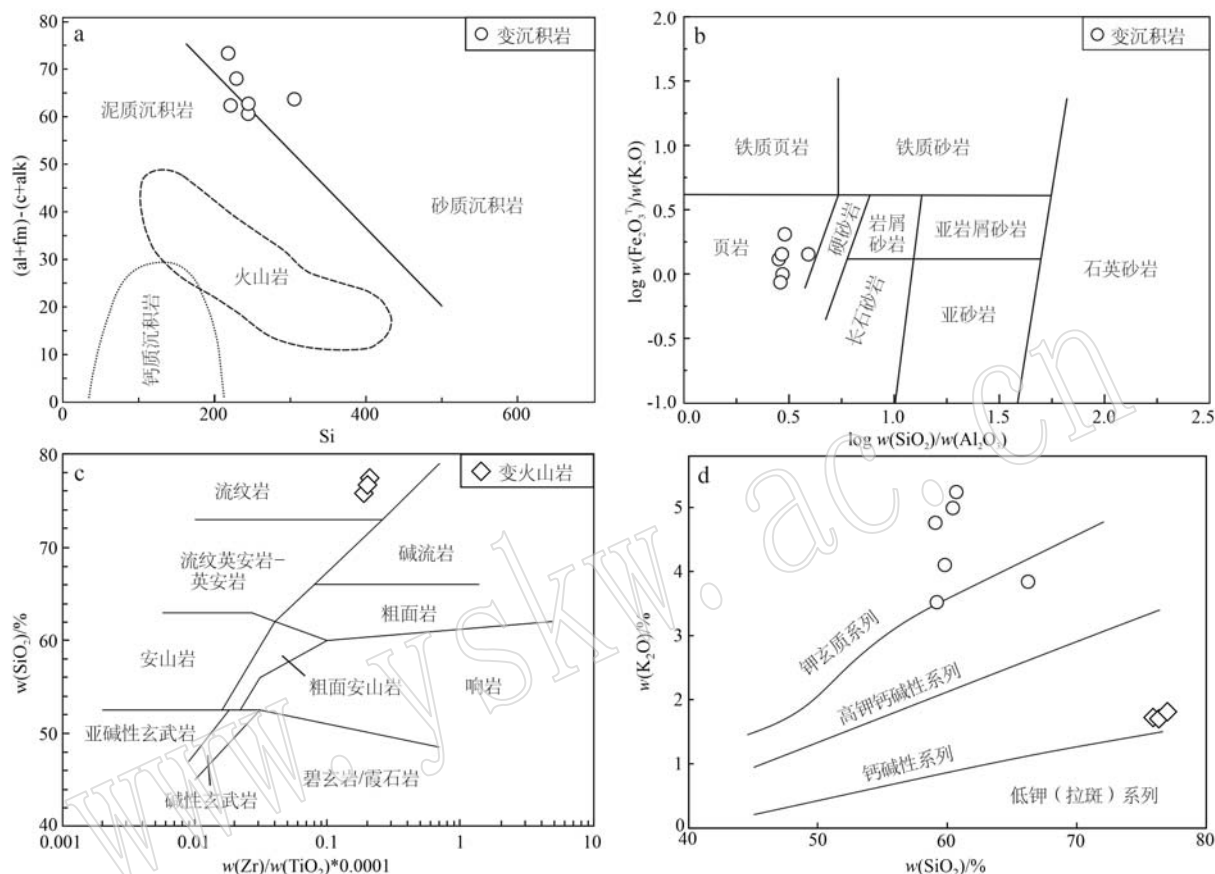


图6 大红山群老厂河组变沉积岩(a,b)和变火山岩(c,d)原岩类型判别图解

Fig. 6 Geochemical diagrams of meta-sedimentary rocks (a, b) and meta-volcanic rocks (c, d) from the Laochanghe Formation, Dahongshan Group

a— $(al+fm)-(c+alk)-Si$ 图解(据 Simonen, 1953); b— $\log(Fe_2O_3^T/K_2O)-\log(SiO_2/Al_2O_3)$ 图解(据 Herron, 1988); c— SiO_2-Zr/TiO_2 分类图解(据 Winchester and Floyd, 1977); d— K_2O-SiO_2 图解(据 Peccenillo and Taylor, 1976)

a— $(al+fm)-(c+alk)$ versus Si diagram (after Simonen, 1953); b— $\log(Fe_2O_3^T/K_2O)$ versus $\log(SiO_2/Al_2O_3)$ diagrams (after Herron, 1988); c— SiO_2 versus Zr/TiO_2 diagram (after Winchester and Floyd, 1977); d— K_2O versus SiO_2 diagram (after Peccenillo and Taylor, 1976)

4.2 稀土、微量元素特征

大红山群老厂河组变沉积岩和变火山岩具有不同的稀土、微量元素配分型式和元素组成特征(图7),详细描述如下:

4.2.1 变沉积岩

在原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图7a),变沉积岩富集大离子亲石元素(LILEs;如Rb、Th、U、Pb),亏损高场强元素(HFSEs;Nb、Ta、Zr、Hf和Ti)。富集Pb和亏损Sr元素可能与流体作用有关

(Becker *et al.*, 2000; Sadofsky and Bebout, 2003)。总之,变沉积岩微量元素的分布型式与平均上地壳沉积物类似。

在球粒陨石均一化稀土元素配分图解中(图7c),变沉积岩呈轻稀土元素富集的分布型式,稀土元素总量(ΣREE)变化范围为 $226.01 \times 10^{-6} \sim 772.75 \times 10^{-6}$,平均值 432.9×10^{-6} ;LREE/HREE值为12.61~18.14,平均值15.73; $(La/Yb)_N = 16.21 \sim 34.78$,平均值24.69, $(La/Sm)_N = 4.45 \sim 4.90$,平均值

4.72, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 2.12 \sim 3.29$, 平均值 2.80; Ce 异常不明显 ($\delta\text{Ce} = 0.89 \sim 0.97$), Eu 负异常较明显 ($\delta\text{Eu} = 0.54 \sim 0.66$)。变沉积岩的轻稀土元素较重

稀土分馏明显, 负 Eu 异常的稀土元素配分型式特点与晚太古代页岩的稀土配分型式相似 (Taylor, 1965)。

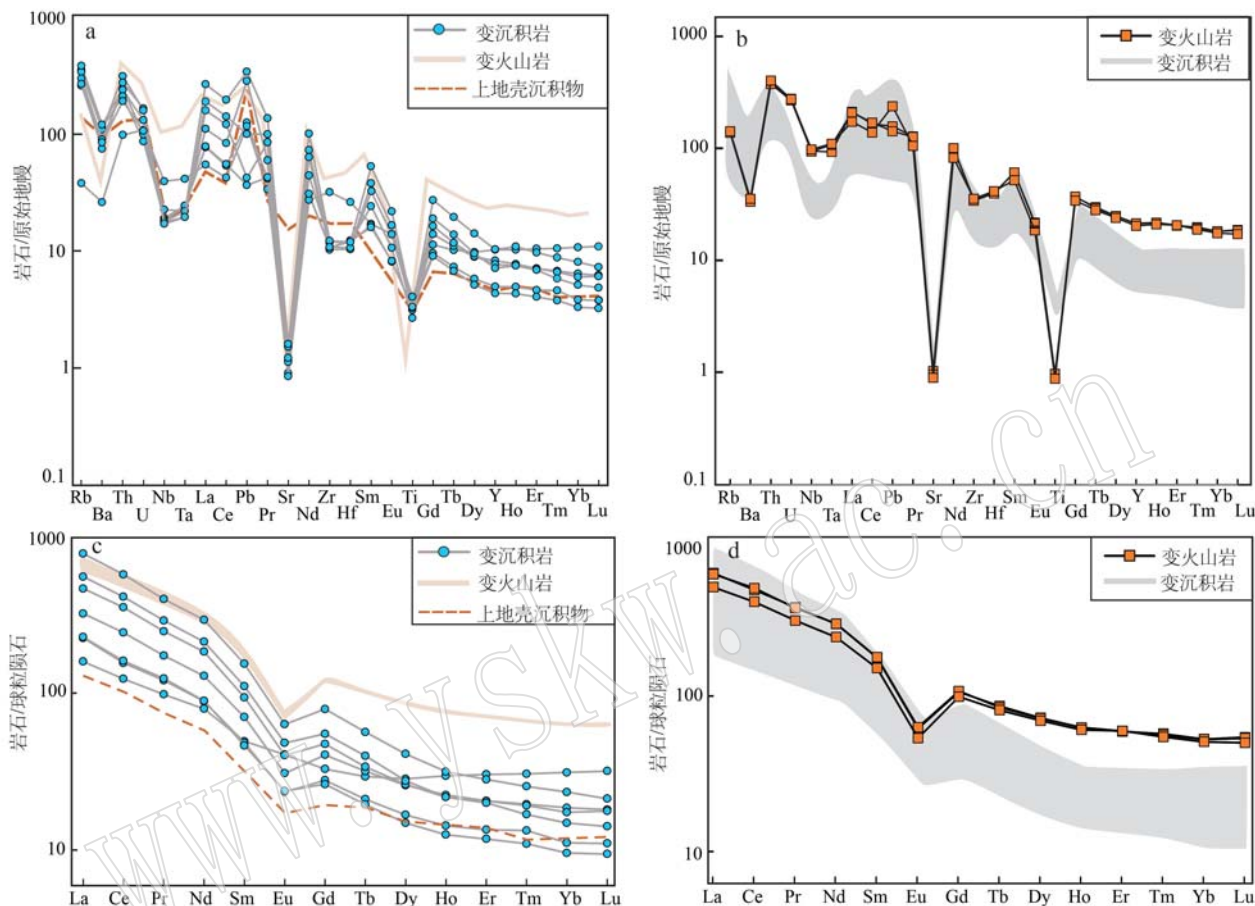


图7 大红山群老厂河组变火山-沉积岩的原始地幔标准化微量元素蛛网图(a、b)和球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图(c、d) (原始地幔和球粒陨石数据均来自 Sun and McDonough, 1989; 上地壳数据来自 Rudnick and Gao, 2003)

Fig. 7 Primitive mantle-normalized trace element (a, b) and chondrite-normalized REE diagrams (c, d) of meta-sedimentary and meta-volcanic rocks from the Laochanghe Formation, Dahongshan Group (normalized values of primitive mantle and chondrite are from Sun and McDonough, 1989; the upper continental crust value is from Rudnick and Gao, 2003)

4.2.2 变火山岩

在原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图7b), 变火山岩富集 LIFEs (Rb、Th、Pb、U 等), 亏损 HFSEs (Nb、Ta 等), 轻微亏损 Zr 和 Hf; Ba、Sr、Ti 负异常明显。

在球粒陨石均一化稀土元素配分图解中(图7d), 变火山岩属于轻稀土元素富集型的分布型式。 ΣREE 变化范围为 $596.72 \times 10^{-6} \sim 714.80 \times 10^{-6}$, 平均值 673.27×10^{-6} ; LREE/HREE 值范围变化在 8.11 ~ 9.41, 平均值 8.95; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 9.27 \sim 10.94$, 平均值 10.34, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 3.23 \sim 3.40$, 平均值 3.32, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.90 \sim 1.99$, 平均值 1.95; Eu 负异常明

显 ($\delta\text{Eu} = 0.43 \sim 0.44$), 无明显 Ce 异常 ($\delta\text{Ce} = 0.96 \sim 0.99$)。

5 锆石 U-Pb 年龄

对大红山群老厂河组变沉积岩和变火山岩样品进行 LA-ICP-MS 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年, 限定大红山群的形成时代和变质时代。

变沉积岩(石榴黑云大理岩)样品 21DHS04-3 的锆石为半自形-他形柱状或圆状, 部分锆石破碎呈不规则状。锆石长轴以 $100 \sim 180 \mu\text{m}$ 为主, 短轴以 $60 \sim 100 \mu\text{m}$ 为主, 长宽比值约 1:1 ~ 3:1。阴极发光

图像(图8a)显示,锆石多为深灰色和亮白色,发育清晰的振荡环带,少量锆石具有核-边结构,发育后期重结晶的深灰色窄边。部分锆石发育扇形分带、

面状分带、弱分带-无分带等内部结构。测试部位集中于发育振荡环带的锆石,其Th/U值基本大于0.1(图9)。

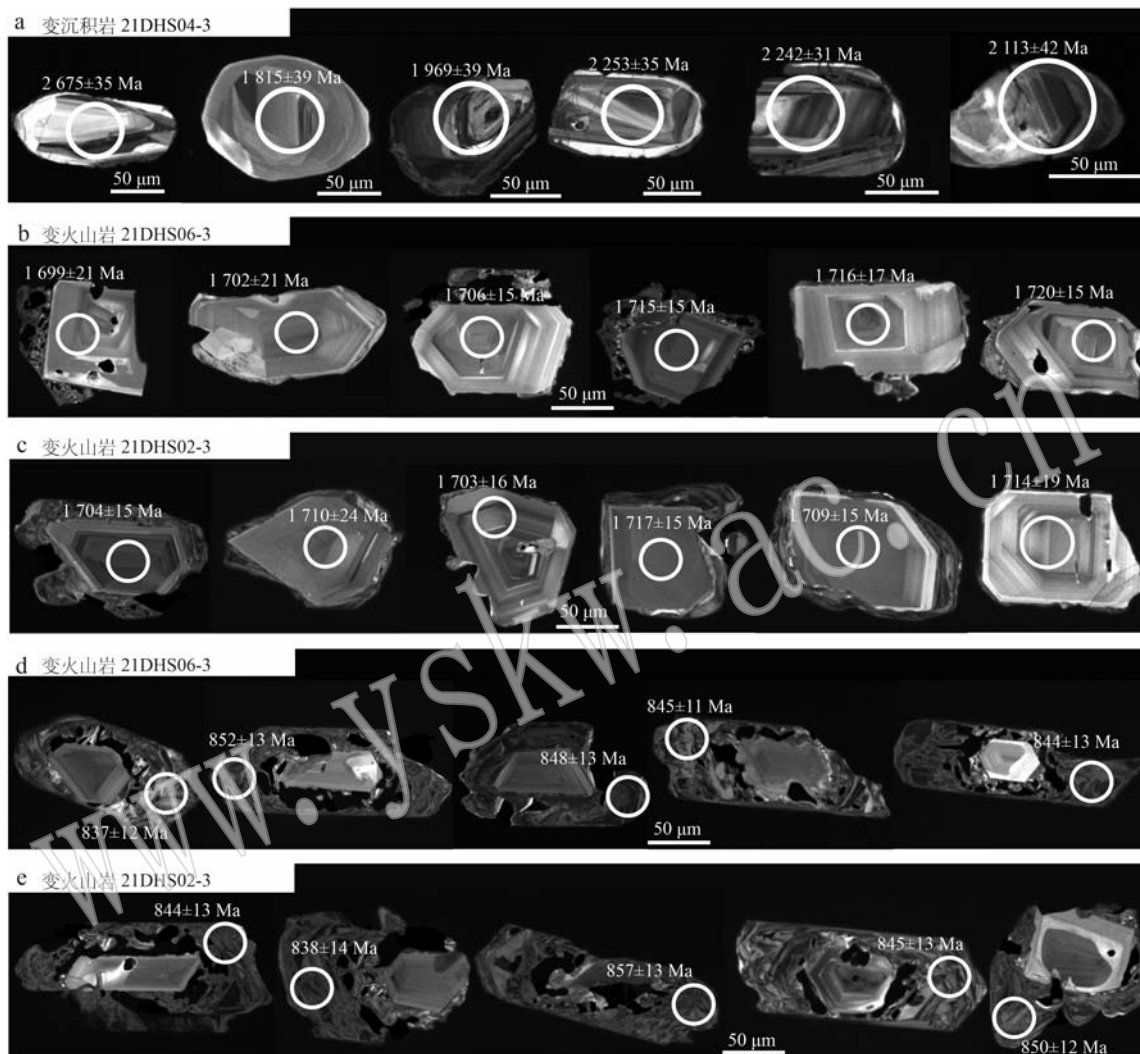


图8 大红山群老厂河组变火山-沉积岩的锆石阴极发光图像

Fig. 8 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons of meta-sedimentary and meta-volcanic rocks from the Laochanghe Formation, Dahongshan Group

变火山岩(石榴长石石英片岩)样品 21DHS06-3 和 21DHS02-3 的锆石呈自形板状或短柱状,颗粒大小不一,长轴粒径约 90~200 μm ,短轴粒径约 35~100 μm ,长宽比 1.5:1~4:1。锆石 CL 图像显示具核边结构(图8),锆石核部发育浅白色或灰色的振荡环带(图8b、8c),边部呈不规则状,发育发光不均匀且宽窄不等的增生边(图8d、8e)。锆石核部的Th/U值均大于0.4,边部Th/U值小于0.1。锆石的形态、CL图像和Th/U值表明变火山岩锆石的核部和增生边具有不同成因,分别对应于岩浆型锆石和

变质型锆石。

5.1 变沉积岩的碎屑锆石年龄

变沉积岩(石榴黑云大理岩)样品 21DHS04-3 的碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年数据详见表2。选择谐和度大于80%的锆石年龄作为有效数据进行讨论。对于年龄小于1.0 Ga的锆石取 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,大于1.0 Ga的锆石取 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄。具体分析结果如下:

主要对变沉积岩样品的锆石核部开展定年和微量元素分析。研究表明,锆石颗粒Th、U含量分别为

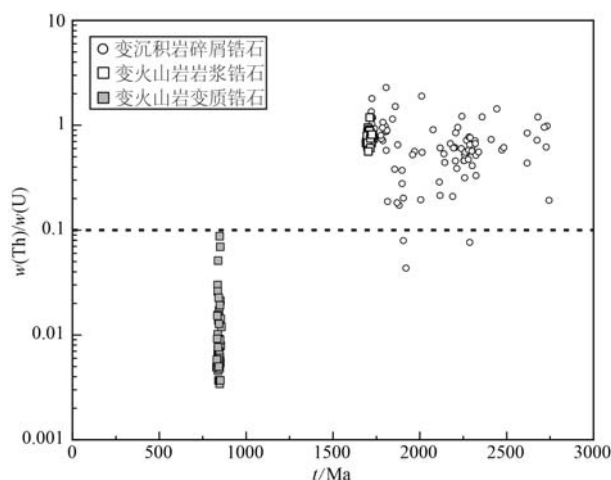


图9 大红山群老厂河组变火山-沉积岩的锆石 Th/U-U-Pb 年龄值图

Fig. 9 Th/U ratio vs. plot zircon U-Pb age of meta-sedimentary rocks and meta-volcanic rocks from the Laochanghe Formation, Dahongshan Group

$46.6 \times 10^{-6} \sim 1.243 \times 10^{-6}$ 和 $37.2 \times 10^{-6} \sim 1.832 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 $0.04 \sim 2.29$ (平均值 0.7)。稀土元素分析结果显示(图 10a),该样品挑选出来的 59 颗代表性碎屑锆石具有轻稀土元素亏损、重稀土元素富集、明显 Ce 正异常和 Eu 负异常的特征。综合锆石的振荡环带、高 Th/U 值(平均值 0.7)和稀土元素配分模式表明大部分锆石颗粒属于岩浆锆石。

通过对 99 颗碎屑锆石核部进行 LA-ICP-MS U-Pb 定年,得到 84 个分布于谐和线附近的有效数据(图 10b)。锆石年龄范围在 $2.744 \sim 1.694$ Ma,锆石 U-Pb 年龄频率直方图显示(图 10c),碎屑锆石的年龄具有两个主峰,分别为 $1.900 \sim 1.750$ Ma 和 $2.300 \sim 2.200$ Ma,次峰为 $2.750 \sim 2.600$ Ma。最年轻的一组碎屑锆石加权平均年龄为 1.749 ± 23 Ma (MSWD = 0.71 , $n=12$)。

5.2 变火山岩的岩浆锆石年龄

变火山岩(石榴长石石英片岩)样品 21DHS06-3 和 21DHS02-3 的锆石 U-Pb 测年数据结果见表 3。

21DHS06-3: 分别选取 30 颗锆石核部和 27 颗锆石增生边进行 SHRIMP U-Pb 定年测试,锆石核部的 Th、U 含量分别为 $92 \times 10^{-6} \sim 409 \times 10^{-6}$ (平均值 216×10^{-6}) 和 $139 \times 10^{-6} \sim 463 \times 10^{-6}$ (平均值 278×10^{-6}), Th/U 值为 $0.58 \sim 0.91$, 平均值 0.78 , 为典型的岩浆成因锆石。30 颗锆石核部的年龄均落在谐和线上且 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄集中于 1.730 ± 13 Ma $\sim 1.696 \pm 21$ Ma

变化范围,加权平均年龄为 1.713 ± 6 Ma (MSWD = 0.35 , 图 11b),此年龄应代表变火山岩的原岩形成时代。

21DHS02-3: 选取 30 颗锆石核部和 23 颗锆石增生边进行 SHRIMP U-Pb 定年测试,锆石核部 Th ($115 \times 10^{-6} \sim 714 \times 10^{-6}$, 平均 242×10^{-6}) 和 U ($175 \times 10^{-6} \sim 602 \times 10^{-6}$, 平均 298×10^{-6}) 含量相对较高, Th/U 值为 $0.68 \sim 1.23$, 平均值 0.81 , 为典型的岩浆成因锆石。30 颗锆石核部的年龄皆落在谐和线上且 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄集中于 1.730 ± 17 Ma $\sim 1.691 \pm 24$ Ma, 加权平均年龄为 1.711 ± 6 Ma (MSWD = 0.41 , 图 11e), 对应于变火山岩的原岩成岩年龄。

5.3 变火山岩的变质锆石年龄

样品 21DHS06-3 锆石增生边的 Th、U 含量分别为 $1.7 \times 10^{-6} \sim 36.8 \times 10^{-6}$ (平均值 8.6×10^{-6}) 和 $358 \times 10^{-6} \sim 1.722 \times 10^{-6}$ (平均值 813×10^{-6})。Th/U 值极低,为 $0.004 \sim 0.072$, 平均值 0.012 , 属于变质锆石的成分特点。27 颗变质锆石增生边显示一致的谐和年龄, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中于 854 ± 13 Ma $\sim 832 \pm 12$ Ma 之间, 加权平均年龄为 843 ± 5 Ma (MSWD = 0.26 , 图 11c), 记录一期新元古代变质事件的年龄。

样品 21DHS02-3 锆石增生边的 Th、U 含量分别为 $3 \times 10^{-6} \sim 55 \times 10^{-6}$ (平均值 13×10^{-6}) 和 $625 \times 10^{-6} \sim 1.590 \times 10^{-6}$ (平均值 955×10^{-6})。Th/U 值极低,为 $0.004 \sim 0.031$, 平均值 0.015 , 均小于 0.1 , 是典型的变质成因锆石。23 颗变质增生边锆石的 U-Pb 年龄均沿谐和曲线分布, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中分布在 857 ± 13 Ma $\sim 830 \pm 13$ Ma 范围, 加权平均年龄为 843 ± 5 Ma (MSWD = 0.31 , 图 11f), 代表变火山岩的变质年龄。

6 讨论

6.1 大红山群变沉积岩的原岩性质及源区特征

前人研究主要通过大红山群变火山岩来识别原岩的构造环境(钱锦和等, 1990; Hu *et al.*, 1991; 张学诚, 1995; 杨红等, 2014; 戚金栋, 2016), 然而大红山群变沉积岩的原岩性质及成因缺乏相关研究。变沉积岩是大红山群重要的岩石组成, 记录了早期地质历史和沉积环境(Greentree and Li, 2008)。因此, 利用变沉积岩研究其原岩性质、源区特征和沉积环境可为准确反演大红山群的构造背景和演化过程提供证据支持。前人有关大红山群变沉积岩的研

表 2 大红山群变沉积岩 (21DHS04-3) 中碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年数据
Table 2 LA-ICP-MS detrital zircon U-Pb isotopic data of a meta-sedimentary rock (21DHS04-3) from the Dahongshan Group

测点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值				同位素年龄			
	$^{206}\text{Pb}_c$	U	Th		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$
21DHS04-3-01	260	306	311	0.98	0.188 90	0.004 12	13.059 40	0.359 59	0.496 72	0.009 39	2.732	36
21DHS04-3-02	583	1 391	1 031	1.35	0.105 38	0.002 30	4.084 11	0.122 57	0.277 73	0.005 56	1.721	40
21DHS04-3-03	104	83	116	0.72	0.182 45	0.003 85	14.138 96	0.294 56	0.559 30	0.006 07	2.675	35
21DHS04-3-06	306	312	536	0.58	0.161 62	0.003 25	8.839 64	0.180 68	0.394 08	0.004 01	2.473	34
21DHS04-3-07	437	416	752	0.55	0.143 42	0.003 05	8.341 28	0.182 83	0.418 80	0.004 33	2.269	37
21DHS04-3-08	342	489	540	0.91	0.128 41	0.003 03	6.810 96	0.160 65	0.382 72	0.004 24	2.076	41
21DHS04-3-09	397	791	806	0.98	0.106 16	0.002 40	4.193 54	0.098 43	0.285 16	0.003 87	1.800	42
21DHS04-3-11	193	352	493	0.71	0.109 22	0.002 33	3.045 42	0.083 03	0.200 91	0.003 69	1.787	39
21DHS04-3-12	81	98	256	0.38	0.112 80	0.002 76	3.730 30	0.095 47	0.238 06	0.002 46	1.856	39
21DHS04-3-13	539	854	1 009	0.85	0.138 36	0.002 68	6.372 83	0.129 43	0.331 64	0.003 34	2.207	34
21DHS04-3-14	286	244	473	0.52	0.147 02	0.003 08	8.907 74	0.186 23	0.437 05	0.004 35	2.322	36
21DHS04-3-15	310	185	949	0.19	0.123 31	0.002 93	5.173 70	0.144 30	0.300 62	0.004 03	2.006	42
21DHS04-3-16	540	1 282	561	2.29	0.110 44	0.00275	5.192 75	0.129 27	0.339 25	0.003 96	1.806	45
21DHS04-3-17	466	657	547	1.20	0.151 16	0.003 44	9.010 37	0.226 15	0.430 29	0.006 83	2.359	39
21DHS04-3-18	223	287	510	0.56	0.120 89	0.002 61	5.231 75	0.115 64	0.312 00	0.003 59	1.969	39
21DHS04-3-19	278	37	859	0.04	0.117 56	0.002 37	5.815 14	0.115 00	0.356 75	0.003 49	1.920	36
21DHS04-3-20	713	774	1 077	0.72	0.143 42	0.002 73	8.773 73	0.175 61	0.440 41	0.004 75	2.269	33
21DHS04-3-21	336	223	512	0.44	0.176 23	0.003 29	12.420 12	0.234 07	0.507 34	0.004 73	2.618	32
21DHS04-3-22	185	148	321	0.46	0.142 11	0.002 84	8.828 88	0.185 05	0.446 95	0.004 78	2.253	35
21DHS04-3-23	246	342	461	0.74	0.108 85	0.002 38	5.278 46	0.115 45	0.349 42	0.003 82	1.780	40
21DHS04-3-24	439	746	816	0.91	0.103 86	0.002 45	4.299 07	0.105 66	0.297 64	0.003 66	1.694	43
21DHS04-3-25	198	260	451	0.58	0.110 48	0.002 39	4.943 36	0.105 53	0.321 68	0.003 21	1.807	44
21DHS04-3-26	144	119	259	0.46	0.141 47	0.002 86	8.122 38	0.172 38	0.412 39	0.004 58	2.256	35
21DHS04-3-27	234	55	717	0.08	0.144 94	0.002 72	7.050 91	0.175 87	0.349 62	0.006 66	2.287	33
21DHS04-3-28	286	98	514	0.19	0.189 00	0.003 50	12.763 52	0.250 81	0.484 87	0.005 45	2.744	31
21DHS04-3-29	385	353	676	0.52	0.142 50	0.002 61	8.349 54	0.173 48	0.420 11	0.005 40	2.258	36
21DHS04-3-30	182	294	334	0.88	0.110 35	0.002 29	5.158 23	0.104 96	0.335 74	0.003 34	1.806	37
21DHS04-3-31	194	107	572	0.19	0.110 94	0.002 37	5.094 10	0.105 17	0.329 78	0.003 34	1.815	39
21DHS04-3-33	307	505	632	0.80	0.108 56	0.002 27	4.750 83	0.097 52	0.314 21	0.003 24	1.776	38
21DHS04-3-34	129	230	215	1.07	0.109 32	0.002 34	5.148 01	0.109 27	0.338 09	0.003 26	1.788	39

续表 2-1
Continued Table 2-1

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				同位素年龄			
	$^{206}\text{Pb}_c$	U	Th	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
21DHS04-3-35	187	181	301	0.146 00	0.002 84	8.845 12	0.169 56	0.435 29	0.003 88	2 330	17
21DHS04-3-36	636	1 293	682	0.123 76	0.002 20	6.289 11	0.117 06	0.364 94	0.003 56	2 011	17
21DHS04-3-37	348	401	335	0.182 95	0.003 37	13.432 75	0.246 85	0.528 22	0.004 96	2 680	21
21DHS04-3-38	395	449	733	0.138 02	0.002 72	7.283 88	0.147 16	0.379 52	0.003 68	2 202	17
21DHS04-3-39	239	264	371	0.147 53	0.003 16	8.775 44	0.186 74	0.428 25	0.004 00	2 318	18
21DHS04-3-42	266	523	365	0.158 83	0.003 21	8.649 32	0.188 83	0.392 01	0.004 62	2 444	21
21DHS04-3-43	281	294	307	0.186 94	0.004 52	13.038 22	0.276 47	0.503 20	0.007 65	2 717	33
21DHS04-3-44	206	148	534	0.116 15	0.002 34	5.588 29	0.115 11	0.346 78	0.004 10	1 898	20
21DHS04-3-45	155	156	260	0.140 85	0.002 84	8.089 61	0.161 09	0.413 45	0.003 46	2 239	16
21DHS04-3-46	55	75	116	0.114 58	0.002 88	5.304 27	0.130 51	0.334 37	0.003 70	1 873	18
21DHS04-3-47	423	419	918	0.138 24	0.003 02	7.008 72	0.185 82	0.364 05	0.006 19	2 205	29
21DHS04-3-49	312	236	747	0.142 54	0.003 02	6.946 32	0.155 69	0.350 11	0.003 96	2 258	19
21DHS04-3-50	159	198	378	0.120 20	0.002 93	5.129 50	0.114 55	0.307 36	0.002 96	1 959	15
21DHS04-3-51	267	154	765	0.116 59	0.002 27	5.476 83	0.107 02	0.337 94	0.003 14	1 906	15
21DHS04-3-52	213	449	298	0.113 66	0.002 43	5.217 07	0.106 18	0.330 52	0.002 88	1 859	14
21DHS04-3-53	489	620	802	0.144 57	0.002 64	8.039 41	0.160 19	0.400 00	0.005 12	2 283	24
21DHS04-3-55	395	215	1 005	0.131 40	0.002 83	6.619 23	0.154 08	0.360 56	0.003 19	2 117	15
21DHS04-3-56	220	186	420	0.133 46	0.002 92	7.741 69	0.167 94	0.416 87	0.004 14	2 144	19
21DHS04-3-58	234	283	372	0.145 22	0.003 00	8.228 87	0.170 06	0.407 34	0.004 34	2 290	20
21DHS04-3-59	238	262	431	0.131 47	0.002 56	7.177 04	0.158 35	0.391 86	0.004 98	2 118	23
21DHS04-3-60	488	529	960	0.142 70	0.002 80	7.243 06	0.135 50	0.364 76	0.003 83	2 261	18
21DHS04-3-61	609	578	997	0.144 43	0.002 35	8.757 03	0.142 88	0.435 30	0.003 71	2 281	17
21DHS04-3-62	402	345	731	0.144 21	0.002 44	8.446 45	0.140 39	0.420 39	0.003 20	2 280	15
21DHS04-3-63	544	536	822	0.144 94	0.002 46	9.058 48	0.161 91	0.448 56	0.004 48	2 287	20
21DHS04-3-65	707	830	1 243	0.135 95	0.002 72	7.626 83	0.151 96	0.402 69	0.003 75	2 176	17
21DHS04-3-66	313	559	600	0.106 48	0.002 48	4.560 94	0.114 21	0.306 89	0.003 82	1 740	19
21DHS04-3-67	678	1 832	1 018	0.105 49	0.002 21	3.612 84	0.087 56	0.245 50	0.003 34	1 724	17
21DHS04-3-68	356	465	487	0.139 28	0.002 58	8.136 42	0.150 12	0.419 70	0.003 45	2 218	16
21DHS04-3-69	241	433	485	0.110 12	0.002 19	4.376 18	0.091 10	0.285 81	0.003 39	1 811	17
21DHS04-3-70	93	91	108	0.176 31	0.003 6	12.366 53	0.251 62	0.504 87	0.004 83	2 618	21

续表 2-2
Continued Table 2-2

测点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值				同位素年龄			
	$^{206}\text{Pb}_c$	U	Th		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
21DHS04-3-72	230	301	546	0.55	4.788 54	0.002 41	0.093 64	0.002 20	2 013	29	1 581	11
21DHS04-3-73	272	243	428	0.57	9.102 29	0.002 93	0.190 77	0.004 51	2 300	35	2 403	20
21DHS04-3-74	184	172	464	0.37	5.244 91	0.002 62	0.118 51	0.003 25	1 898	40	1 817	16
21DHS04-3-75	492	435	710	0.61	10.467 62	0.003 22	0.209 04	0.003 98	2 483	33	2 457	18
21DHS04-3-76	160	100	302	0.33	9.013 85	0.002 93	0.180 43	0.004 93	2 324	29	2 351	22
21DHS04-3-78	232	123	586	0.21	7.126 69	0.002 36	0.150 51	0.005 07	2 189	30	2 064	24
21DHS04-3-80	106	181	192	0.95	4.979 02	0.002 14	0.098 89	0.002 77	1 785	35	1 835	13
21DHS04-3-81	306	188	1 089	0.17	4.452 63	0.002 17	0.097 29	0.003 57	1 881	29	1 587	18
21DHS04-3-82	299	267	689	0.39	6.375 40	0.002 84	0.133 85	0.003 29	2 213	35	1 847	16
21DHS04-3-83	284	279	524	0.53	7.430 56	0.002 48	0.151 27	0.003 98	2 139	33	2 179	18
21DHS04-3-84	96	103	170	0.61	7.590 20	0.002 70	0.149 01	0.003 98	2 194	34	2 168	18
21DHS04-3-85	266	145	794	0.18	5.285 40	0.001 97	0.090 29	0.002 42	1 869	31	1 855	12
21DHS04-3-86	466	638	873	0.73	7.701 78	0.002 92	0.150 29	0.003 60	2 411	27	1 964	17
21DHS04-3-87	286	421	346	1.22	8.233 36	0.002 55	0.156 37	0.003 85	2 242	31	2 260	17
21DHS04-3-88	28	55	47	1.18	4.426 30	0.003 22	0.126 80	0.003 67	1 725	51	1 716	18
21DHS04-3-91	90	88	131	0.67	9.430 71	0.003 22	0.213 08	0.005 49	2 320	37	2 440	24
21DHS04-3-92	163	264	231	1.15	5.709 75	0.002 37	0.118 03	0.003 62	1 843	37	2 008	17
21DHS04-3-93	155	293	286	1.03	4.537 85	0.002 14	0.091 01	0.002 69	1 724	37	1 740	13
21DHS04-3-94	237	231	373	0.62	10.504 61	0.003 86	0.205 95	0.004 80	2 728	34	2 179	22
21DHS04-3-95	148	130	234	0.56	9.482 26	0.002 81	0.187 07	0.004 14	2 339	32	2 424	18
21DHS04-3-96	91	191	160	1.20	4.314 60	0.002 50	0.098 46	0.002 80	1 722	38	1 677	14
21DHS04-3-97	306	237	576	0.41	8.242 33	0.003 45	0.182 39	0.004 73	2 302	40	2 197	22
21DHS04-3-98	182	134	468	0.29	6.047 44	0.003 13	0.143 88	0.003 22	2 113	42	1 847	16
21DHS04-3-99	202	59	746	0.08	4.625 33	0.002 25	0.082 07	0.002 28	1 905	35	1 620	11

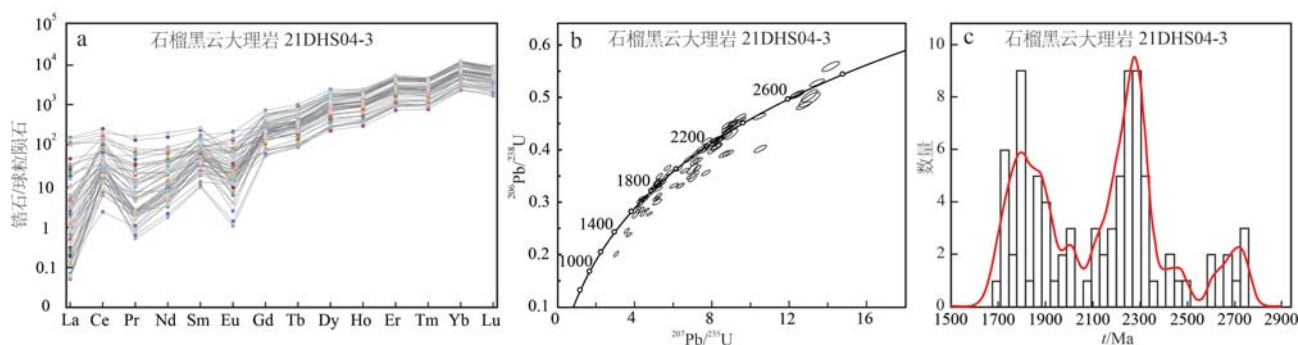


图 10 大红山群老厂河组变沉积岩碎屑锆石球粒陨石均一化稀土元素配分图(a)、U-Pb 年龄谐和图(b)和频率分布直方图(c)

Fig. 10 Detrital zircon chondrite-normalized REE pattern(a), U-Pb concordia diagrams(b) and frequency distribution histograms(c) of meta-sedimentary rocks from the Laochanghe Formation, Dahongshan Group

究程度较低,仅 Greentree 和 Li (2008) 根据大红山群曼岗河组和坡头组保留的原始沉积构造如石英岩交错层理、圆状砾岩,判别变沉积岩沉积于大陆环境;曼岗河组和坡头组碎屑锆石年龄分布特征 (2.4~2.1 Ga、1.9~1.8 Ga 和 3.0~2.6 Ga) 说明沉积物来源于扬子地块西南缘的太古宙-古元古代结晶基底 (Greentree and Li, 2008),但未深入探讨大红山群变沉积岩的原岩类型、沉积时限及形成背景。由于大红山群老厂河组变沉积岩经历变形和变质重结晶作用,未保留原岩的沉积结构和构造。无法通过沉积结构与构造恢复原岩沉积环境及背景。因此,本文综合变沉积岩的岩相学特征、全岩地球化学数据和锆石 U-Pb 年龄,限定变沉积岩的原岩性质及源区特征。

岩石地球化学方法恢复原岩的依据是变质岩原岩的主量元素和微量元素经等化学变质后特征无明显变化 (桑隆康等, 2012)。矿物遭受风化作用时主量元素 K、Na、Ca 等自由离子易发生迁移,而 Al、Si、Ti 等络阴离子能稳定存在。微量元素中部分活动性较强的大离子亲石元素,如 Rb、Ba、U 等受经流体作用的变质过程而易发生迁移;不活动组分高场强元素,如 Nb、Ta、Zr、Hf 等相对能反映变质岩石的原岩性质。因此,利用稳定的主量元素和微量元素判别图解反映原岩性质和源区特征是相对可靠的。

评估源区风化剥蚀强度的定量指数主要是化学蚀变指数 (CIA; Nesbitt and Young, 1982) 和成分变异指数 (ICV; Cox *et al.*, 1995)。变沉积岩的 CIA 值介于 71.73~77.10 之间,平均值为 73.70 (表 1),高于大陆上地壳值 (UCC) (46; Sun and McDonough, 1989),接近于平均页岩值 (70~75; Nesbitt and Young,

1982),表明其源区物质经历了较强的风化作用 (图 12a)。但利用 CIA 判断物源区风化程度时需要排除沉积再旋回和沉积分异的影响,因此使用 ICV 可度量泥质岩成分成熟度和矿物成分抗风化程度 (Cox *et al.*, 1995)。ICV 值 >1,表明源区物质含黏土矿物较少,风化对沉积物的影响有限;ICV 值 <1 代表源区物质含较多的黏土矿物,可能经历再沉积作用或是强烈风化条件下的初始沉积。经计算得出本文 6 件变沉积岩样品的 ICV 值范围为 0.65~0.70,平均值 0.68,表明原岩黏土矿物相对含量较高,物源物质成分成熟度高,所受风化作用较强。Th/U-Th 图解 (图 12b) 显示样品的 Th/U 值大于上地壳,呈一定的风化趋势 (Taylor and McLennan, 1985)。综上,变沉积岩源区物质含黏土矿物较高,成分成熟度高,风化影响较强。

在 $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3^T - \text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解中 (图 12c),变沉积岩样品投影于长英质火山岩和花岗岩平均值范围内,显示原岩的碎屑物质主要来源于中酸性岩浆岩;在 La/Th-Hf 图解中 (图 13d),变沉积岩落入长英质/基性混合源区和酸性岩浆弧源区,说明原岩沉积物主要来源于中酸性岩浆岩;在 $\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}) - \text{K}_2\text{O}$ (A-CN-K; Nesbitt and Young, 1989) 图解 (图 12e),变沉积岩投在安山质-花岗闪长质的过渡成分范围,表明其原岩的源区物质以富 Al_2O_3 和 K_2O 组分为特征。因锆石经沉积分异和再循环强烈富集,Sc 保留源区性质 (McLennan, 1989),Zr/Sc 可指示沉积物沉积分异和再循环程度。在火成岩形成过程中,Th 和 Sc 分别以不相容元素和相容元素的形式发生分异。在沉积过程中,Th 和 Sc 均以陆源组分的形式发生运移,因此 Th/Sc 常用于指示原岩化学分异过程

表 3 大红山群变火山岩 (21DHS06-3 和 21DHS02-3) 中锆石 SHRIMP U-Pb 定年数据
Table 3 SHRIMP zircon U-Pb isotopic data of meta-volcanic rocks (21DHS06-3 and 21DHS02-3) from the Dahongshan Group

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				同位素年龄			
	$^{206}\text{Pb}_e$	U	Th	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$
21DHS06-3 锆石核部 1 713±6 Ma (MSWD=0.35)											
21DHS06-3-1	0.01	330	263	0.82	0.84	0.104 26	1.8	4.518	1.6	0.304 1	1.712
21DHS06-3-2	0.01	422	373	0.91	0.73	0.104 64	1.8	4.497	1.6	0.305 6	1.719
21DHS06-3-3	0.06	336	252	0.77	0.84	0.106 11	1.8	4.570	1.6	0.306 2	1.722
21DHS06-3-4	0.06	229	180	0.81	0.98	0.104 60	2.0	4.574	1.7	0.311 1	1.746
21DHS06-3-5	0.10	183	121	0.68	1.10	0.104 80	2.1	4.634	1.7	0.314 7	1.764
21DHS06-3-6	0.12	232	179	0.80	1.10	0.105 40	2.0	4.572	1.7	0.308 6	1.734
21DHS06-3-7	—	217	170	0.81	0.97	0.105 09	2.0	4.568	1.7	0.307 1	1.726
21DHS06-3-8	0.09	342	292	0.88	0.82	0.105 02	1.9	4.562	1.7	0.308 8	1.735
21DHS06-3-9	0.10	139	111	0.83	1.30	0.104 30	2.2	4.650	1.8	0.317 4	1.777
21DHS06-3-10	0.04	341	295	0.89	0.82	0.104 62	1.9	4.503	1.7	0.306 0	1.721
21DHS06-3-11	0.07	343	277	0.83	1.10	0.104 30	2.1	4.526	1.7	0.308 6	1.734
21DHS06-3-12	0.00	463	409	0.91	0.69	0.104 83	1.8	4.549	1.6	0.307 8	1.730
21DHS06-3-13	0.14	199	140	0.72	1.10	0.104 00	2.1	4.618	1.7	0.309 1	1.736
21DHS06-3-14	0.05	350	283	0.84	0.82	0.105 24	1.9	4.607	1.7	0.311 4	1.748
21DHS06-3-15	0.06	179	112	0.65	1.10	0.104 10	2.1	4.632	1.7	0.315 9	1.770
21DHS06-3-16	0.13	221	174	0.82	1.10	0.104 70	2.0	4.567	1.7	0.310 2	1.742
21DHS06-3-17	0.06	317	249	0.81	0.82	0.104 52	1.9	4.586	1.7	0.312 1	1.751
21DHS06-3-18	0.15	302	241	0.82	0.95	0.103 95	1.9	4.517	1.7	0.309 0	1.736
21DHS06-3-19	0.02	366	283	0.80	0.77	0.105 42	1.8	4.520	1.7	0.304 8	1.715
21DHS06-3-20	0.01	407	325	0.83	0.73	0.105 88	1.8	4.566	1.6	0.306 6	1.724
21DHS06-3-21	0.00	251	183	0.75	0.90	0.104 99	1.9	4.559	1.7	0.308 8	1.735
21DHS06-3-22	0.26	250	199	0.82	1.10	0.105 21	2.0	4.584	1.7	0.306 2	1.723
21DHS06-3-23	0.09	189	117	0.64	1.10	0.104 50	2.0	4.587	1.7	0.312 0	1.751
21DHS06-3-24	0.10	177	120	0.70	1.10	0.105 40	2.1	4.620	1.7	0.311 7	1.749
21DHS06-3-25	0.07	226	154	0.70	0.98	0.104 20	2.0	4.597	1.7	0.313 7	1.759
21DHS06-3-26	0.04	333	268	0.83	0.81	0.105 30	1.8	4.556	1.7	0.307 6	1.729
21DHS06-3-27	0.06	182	110	0.63	1.10	0.105 03	2.0	4.610	1.7	0.308 5	1.734
21DHS06-3-28	0.07	164	92	0.58	1.10	0.104 41	2.1	4.599	1.7	0.315 3	1.767
21DHS06-3-29	0.00	257	192	0.77	0.91	0.105 09	1.9	4.624	1.7	0.312 9	1.755
21DHS06-3-30	0.02	391	319	0.84	0.75	0.105 56	1.8	4.586	1.6	0.308 9	1.736
21DHS06-3 锆石边部 843±5 Ma (MSWD=0.26)											
21DHS06-3-31	0.15	802	11.0	0.014	1.20	0.066 58	2.0	1.298	1.6	0.140 4	847
21DHS06-3-32	0.01	1 266	7.4	0.006	0.82	0.066 47	1.8	1.287	1.6	0.138 6	837
21DHS06-3-33	0.05	855	5.9	0.007	0.93	0.066 75	1.9	1.307	1.6	0.140 3	846
21DHS06-3-34	0.05	525	36.3	0.071	1.40	0.068 00	2.4	1.314	2.0	0.141 1	851
21DHS06-3-35	—	792	2.7	0.004	0.95	0.066 68	1.9	1.314	1.6	0.140 6	848

续表 3-1
Continued Table 3-1

测点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值				同位素年龄			
	$^{206}\text{Pb}_e$	U	Th		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$
21DHS06-3-36	0.02	1 525	11.1	0.007	1.289	1.8	0.138 8	1.6	838	11	788	16
21DHS06-3-37	0.04	1 071	14.7	0.014	1.291	1.8	0.139 2	1.6	840	12	813	18
21DHS06-3-38	0.05	916	3.4	0.004	1.296	1.8	0.140 6	1.6	848	13	822	18
21DHS06-3-39	0.15	551	3.0	0.006	1.309	2.1	0.141 3	1.6	852	12	820	29
21DHS06-3-40	0.18	620	8.8	0.015	1.318	2.1	0.141 7	1.6	854	13	856	27
21DHS06-3-41	0.00	388	1.9	0.005	1.283	2.1	0.138 1	1.7	834	13	837	27
21DHS06-3-42	0.07	1 341	8.7	0.007	1.292	1.8	0.139 3	1.6	841	12	805	17
21DHS06-3-43	0.06	668	6.0	0.009	1.322	1.9	0.140 9	1.6	850	13	838	21
21DHS06-3-44	0.05	429	2.8	0.007	1.307	2.1	0.140 4	1.6	847	13	846	28
21DHS06-3-45	0.07	730	6.7	0.010	1.283	1.9	0.138 1	1.6	834	12	816	21
21DHS06-3-46	—	361	1.7	0.005	1.314	2.2	0.140 6	1.7	848	14	844	28
21DHS06-3-47	0.09	358	4.6	0.013	1.292	2.2	0.139 9	1.7	844	13	838	31
21DHS06-3-48	0.08	719	36.8	0.053	1.288	2.0	0.139 1	1.6	839	13	842	25
21DHS06-3-49	0.00	504	1.9	0.004	1.314	2.1	0.141 4	1.6	852	13	859	27
21DHS06-3-50	—	912	5.5	0.006	1.308	1.8	0.140 7	1.6	849	12	838	18
21DHS06-3-51	0.01	735	5.6	0.008	1.283	1.9	0.139 0	1.6	839	12	828	21
21DHS06-3-52	0.10	826	12.5	0.016	1.282	1.9	0.138 3	1.6	835	13	845	21
21DHS06-3-53	0.15	1 056	6.0	0.006	1.301	2.5	0.139 1	1.6	845	11	838	41
21DHS06-3-54	0.09	968	5.3	0.006	1.277	2.0	0.138 2	1.6	835	13	838	24
21DHS06-3-55	0.00	922	5.4	0.006	1.269	1.8	0.137 8	1.6	832	12	839	19
21DHS06-3-56	0.18	1 722	8.6	0.005	1.287	1.9	0.139 7	1.6	843	9.3	761	21
21DHS06-3-57	0.35	397	9.0	0.023	1.296	2.6	0.139 5	1.7	842	12	808	42
21DHS02-3 锆石核部 1 711 $\pm$ 6 Ma (MSWD=0.41)												
21DHS02-3-1	0.05	407	327	0.83	4.534	1.8	0.308 6	1.6	1 734	25	1 704	15
21DHS02-3-2	0.07	328	257	0.81	4.499	1.9	0.306 4	1.7	1 723	26	1 704	16
21DHS02-3-3	0.06	358	285	0.82	4.611	1.8	0.310 1	1.7	1 741	26	1 728	14
21DHS02-3-4	0.05	323	256	0.82	4.610	1.9	0.310 8	1.7	1 745	26	1 723	15
21DHS02-3-5	0.04	271	202	0.77	4.624	1.9	0.312 2	1.7	1 752	26	1 708	17
21DHS02-3-6	0.05	275	212	0.80	4.566	1.9	0.311 3	1.7	1 747	26	1 703	16
21DHS02-3-7	0.01	258	197	0.79	4.603	1.9	0.313 9	1.7	1 760	27	1 702	17
21DHS02-3-8	0.04	220	163	0.76	4.598	2.0	0.311 4	1.7	1 748	27	1 715	18
21DHS02-3-9	—	386	313	0.84	4.615	1.8	0.309 9	1.7	1 740	26	1 731	14
21DHS02-3-10	0.10	276	208	0.78	4.588	1.9	0.312 1	1.7	1 751	26	1 707	18
21DHS02-3-11	0.03	175	115	0.68	4.574	2.1	0.311 4	1.7	1 748	27	1 705	21
21DHS02-3-12	0.04	602	714	1.23	4.487	1.7	0.304 2	1.6	1 712	25	1 712	12
21DHS02-3-13	0.11	214	156	0.75	4.595	2.0	0.313 9	1.7	1 760	27	1 698	19
21DHS02-3-14	0.07	383	308	0.83	4.499	1.8	0.305 6	1.7	1 719	25	1 709	15

续表 3-2
Continued Table 3-2

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				同位素年龄			
	$^{206}\text{Pb}_c$	U	Th	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
21DHS02-3-15	0.00	219	161	0.76	0.104 24	0.99	4.565	2.0	0.315 3	1.7	1 701
21DHS02-3-16	0.00	340	272	0.83	0.105 14	0.80	4.633	1.9	0.313 5	1.7	1 717
21DHS02-3-17	0.09	270	206	0.79	0.104 82	0.93	4.724	1.9	0.318 6	1.7	1 711
21DHS02-3-18	0.10	199	135	0.70	0.103 70	1.30	4.572	2.2	0.313 6	1.7	1 691
21DHS02-3-19	0.11	240	175	0.75	0.104 10	1.00	4.601	2.0	0.314 7	1.7	1 698
21DHS02-3-20	1.51	201	154	0.79	0.104 80	1.30	4.520	3.2	0.306 6	1.8	1 710
21DHS02-3-21	0.08	245	170	0.72	0.103 80	1.00	4.542	2.0	0.311 2	1.7	1 693
21DHS02-3-22	0.06	278	208	0.77	0.105 92	0.92	4.599	1.9	0.308 8	1.7	1 730
21DHS02-3-23	0.05	256	204	0.82	0.104 74	0.94	4.601	1.9	0.312 4	1.7	1 710
21DHS02-3-24	0.06	423	401	0.98	0.104 32	0.75	4.537	1.8	0.309 2	1.7	1 702
21DHS02-3-25	0.07	329	270	0.85	0.104 25	0.88	4.577	1.9	0.312 3	1.7	1 701
21DHS02-3-26	0.07	376	342	0.94	0.104 84	0.84	4.643	1.8	0.315 1	1.6	1 711
21DHS02-3-27	0.05	212	151	0.74	0.105 00	1.00	4.644	2.0	0.314 7	1.7	1 714
21DHS02-3-28	0.14	181	123	0.70	0.104 75	1.20	4.580	2.1	0.314 1	1.8	1 710
21DHS02-3-29	0.05	396	340	0.89	0.104 43	0.77	4.529	1.8	0.308 4	1.7	1 704
21DHS02-3-30	-	302	240	0.82	0.105 83	0.86	4.629	1.9	0.307 6	1.7	1 729
21DHS02-3 结石边部 843 ± 5 Ma (MSWD=0.31)											
21DHS02-3-31	0.23	1 590	13	0.009	0.064 53	1.00	1.278	1.9	0.138 1	1.6	759
21DHS02-3-32	0.09	700	5	0.008	0.065 39	1.10	1.293	2.0	0.139 9	1.6	787
21DHS02-3-33	0.30	1 035	22	0.022	0.066 22	1.20	1.291	2.0	0.139 2	1.6	813
21DHS02-3-34	0.18	1 405	17	0.012	0.064 54	1.00	1.283	1.9	0.138 9	1.6	759
21DHS02-3-35	0.12	1 177	9	0.008	0.065 43	0.99	1.309	1.9	0.141 3	1.6	788
21DHS02-3-36	0.33	625	55	0.090	0.067 60	1.50	1.325	2.3	0.142 1	1.7	857
21DHS02-3-37	0.28	628	11	0.018	0.067 30	1.80	1.287	2.4	0.138 8	1.6	847
21DHS02-3-38	0.09	1 594	11	0.007	0.065 59	0.86	1.307	1.8	0.140 6	1.6	793
21DHS02-3-39	0.00	705	4	0.005	0.066 45	1.00	1.301	1.9	0.140 1	1.6	820
21DHS02-3-40	0.07	1 022	8	0.009	0.066 36	1.00	1.287	2.0	0.138 6	1.7	818
21DHS02-3-41	0.31	1 320	13	0.010	0.064 89	1.30	1.313	2.1	0.140 9	1.6	771
21DHS02-3-42	0.07	1 054	4	0.004	0.065 94	0.97	1.302	1.9	0.140 0	1.6	804
21DHS02-3-43	0.04	731	3	0.005	0.067 23	1.00	1.285	2.0	0.138 6	1.7	845
21DHS02-3-44	0.17	923	18	0.020	0.065 37	1.40	1.289	2.1	0.139 3	1.6	786
21DHS02-3-45	0.00	517	8	0.016	0.066 02	1.20	1.291	2.1	0.138 7	1.7	807
21DHS02-3-46	0.00	715	4	0.005	0.067 02	1.00	1.309	2.0	0.140 8	1.7	838
21DHS02-3-47	0.80	631	5	0.008	0.066 90	2.10	1.278	2.7	0.138 6	1.7	835
21DHS02-3-48	0.14	1 144	34	0.031	0.066 34	1.00	1.269	1.9	0.137 3	1.6	817
21DHS02-3-49	0.08	795	7	0.009	0.067 40	1.00	1.317	1.9	0.141 7	1.6	850
21DHS02-3-50	0.17	842	6	0.007	0.066 54	1.20	1.283	2.0	0.138 5	1.6	823
21DHS02-3-51	-	697	4	0.006	0.068 22	1.10	1.307	2.0	0.140 6	1.7	875
21DHS02-3-52	0.08	1 170	8	0.007	0.066 16	1.10	1.291	2.0	0.139 2	1.7	811
21DHS02-3-53	1.05	954	25	0.027	0.065 40	2.30	1.294	2.8	0.140 3	1.7	788

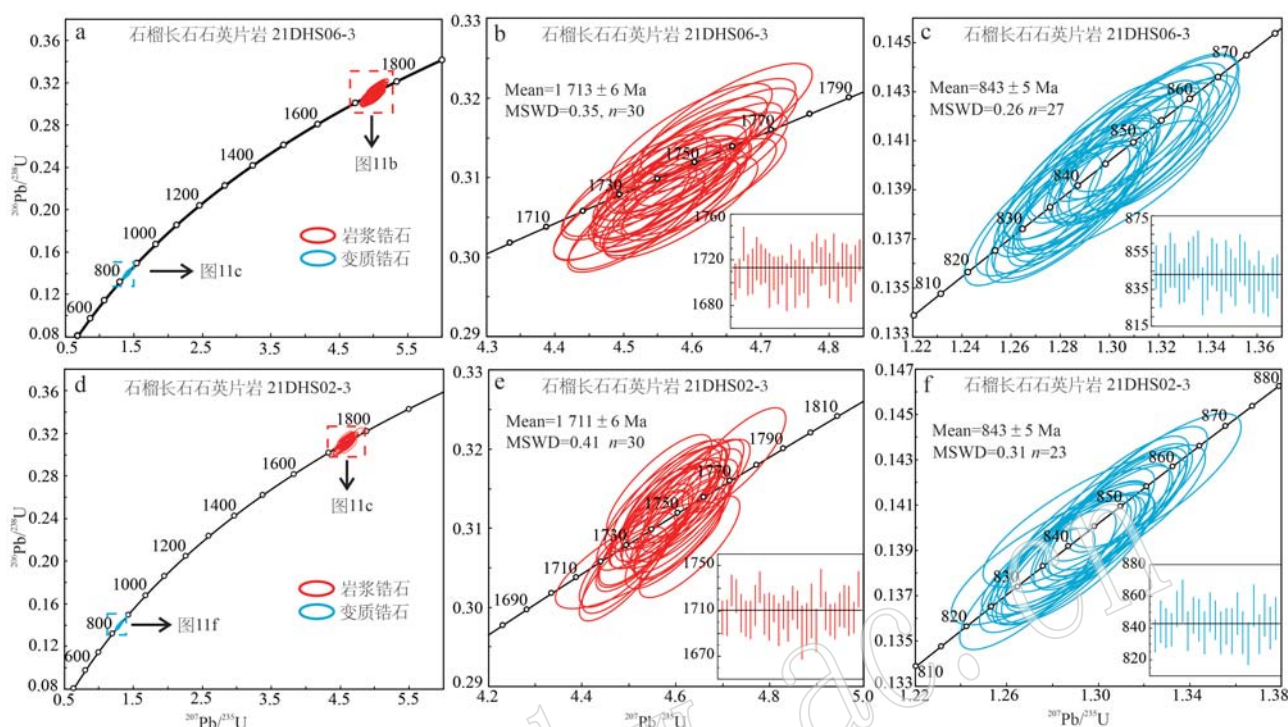


图 11 大红山群老厂河组变火山岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 11 Zircon U-Pb concordia diagrams of meta-volcanic rocks from the Laochanghe Formation, Dahongshan Group

和物源区成分(Taylor and McLennan, 1985)。Th/Sc-Zr/Sc 图解中(图 12f)显示变沉积岩原岩的碎屑物质直接来源于长英质岩浆源区,未经历沉积循环过程。火成岩的 Al、Ti 分别富集在长石和镁铁质矿物中,因此 Al_2O_3/TiO_2 值能反映火成岩的基性程度。当 $Al_2O_3/TiO_2 = 21 \sim 70$ ($SiO_2 = 66\% \sim 76\%$) 时,原岩属于长英质火成岩(Hayashi *et al.*, 1997)。本文变沉积岩样品的 Al_2O_3/TiO_2 值范围为 27.61~30.76, 平均值 29.06(表 1),表明原岩以长英质组分为主。

综上所述,变沉积岩的原岩沉积物源主要以酸性岩浆岩为主,经历较强的风化作用,未经历沉积再循环,化学成分与大陆上地壳相似。

6.2 大红山群变火山岩的原岩属性及成因机制

大红山群变火山岩主要包括变基性岩和变酸性火山岩。有关大红山群变基性岩的原岩性质和构造属性已开展了相关研究,但大红山群变酸性岩的地球化学特征及原岩性质仍不清楚。

如前所述,大红山群老厂河组变火山岩的原岩化学成分相当于钙碱性过铝质流纹岩(图 6),矿物组成以石英和长石为主(图 4),地球化学特征类似于 A 型酸性岩浆岩(花岗岩/流纹岩)(图 13; Loiselle and Wones, 1979; Collins *et al.*, 1982;

Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1990)。主量元素以高的 $Fe_2O_3^T/(MgO+Fe_2O_3^T)$ 值(~ 0.81)和 A/CNK ($1.33 \sim 1.34$) 为特征,微量、稀土元素特征表现为 ΣREE 含量较高;富集 Rb、Th、U;强烈亏损 Sr、Ba、Ti、Eu;亏损 Nb、Ta、Zr、Hf(图 7); $10\,000\,Ga/Al = 3.69 \sim 3.77$ (>2.6 ; Whalen *et al.*, 1987);变火山岩的锆石饱和温度为 $903 \sim 908^\circ C$ (计算方法据 Waston and Harrison, 1983),明显高于 King 等(1997)计算的 I 型花岗岩锆石饱和温度 $764 \sim 781^\circ C$,说明变火山岩原岩形成时的岩浆温度较高,与 A 型酸性岩浆岩锆石饱和温度高于其他酸性岩浆岩类型的结论相一致(King *et al.*, 1997)。在 $(Zr+Nb+Ce+Y) - 10\,000\,Ga/Al$ 和 $Fe_2O_3^T/MgO - 10\,000\,Ga/Al$ 图解(图 13)中,本文变火山岩样品和前人研究的扬子地块西南缘酸性侵入岩样品均落于 A 型酸性岩浆岩区域内。上述地球化学特征表明老厂河组变火山岩的化学成分相当于过铝质 A 型流纹岩。

关于 A 型花岗岩(流纹岩)的成因存在多种模式,主要包括幔源岩浆结晶分异或部分熔融(Loiselle and Wones, 1979; Eby, 1990; Turner *et al.*, 1992)、下地壳长英质麻粒岩相源区发生重熔(Barker *et al.*, 1975; Collins *et al.*, 1982; Anderson, 1983; Jackson

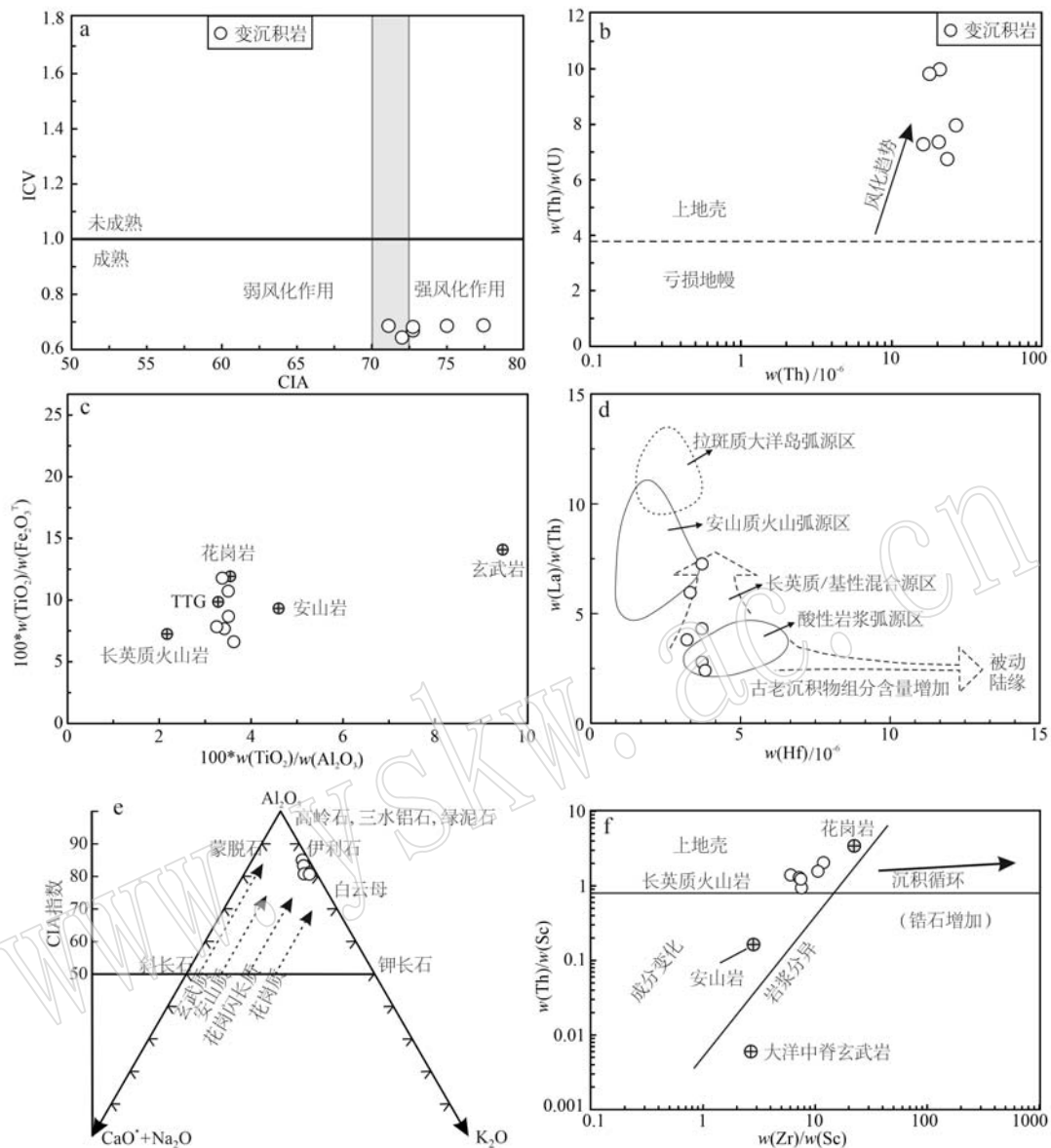


图 12 大红山群老厂河组变沉积岩原岩性质判别图解

Fig. 12 Geochemical discrimination diagrams of meta-sedimentary rocks from the Laochanghe Formation, Dahongshan Group
 a—ICV—CIA 图解 (Cox *et al.*, 1995; Nesbitt and Young, 1982); b—Th/U—Th 图解 (McLennan *et al.*, 1993); c— $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3^T$ — $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解 (Condie, 1993); d—La/Th—Hf 图解 (Floyd and Leveridge, 1987); e— Al_2O_3 —($\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}$)— K_2O 图解 (Nesbitt and Young, 1989); f—Th/Sc—Zr/Sc 图解 (McLennan *et al.*, 1993)
 a—ICV vs CIA. diagram (Cox *et al.*, 1995; Nesbitt and Young, 1982); b—Th/U vs Th. diagram (McLennan *et al.*, 1993); c— $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3^T$ vs. $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ diagram (Condie, 1993); d—La/Th vs. Hf diagram (Floyd and Leveridge, 1987); e— Al_2O_3 —($\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}$)— K_2O diagram (Nesbitt and Young, 1989); f—Th/Sc vs. Zr/Sc diagram (McLennan *et al.*, 1993)

et al., 1984; Clemens *et al.*, 1986; Whalen *et al.*, 1987)、壳源和幔源物质混合 (Dickin *et al.*, 1991; Kerr and Fryer, 1993; Wickham *et al.*, 1995) 以及壳源物质发生混染 (Dickin, 1994) 等。

变火山岩样品因高 SiO_2 含量 (>75.92%)、低

MgO (<0.83%)、Cr、Co、Ni 等亲铁元素含量低 (均 < 10×10^{-6})、与幔源岩浆分离结晶形成低硅且高镁的 A 型花岗岩的实验岩石学结果不一致 (Frost and Frost, 2011), 说明老厂河组变火山岩并非直接由幔源玄武质岩浆经历结晶分异过程形成。老厂河组变

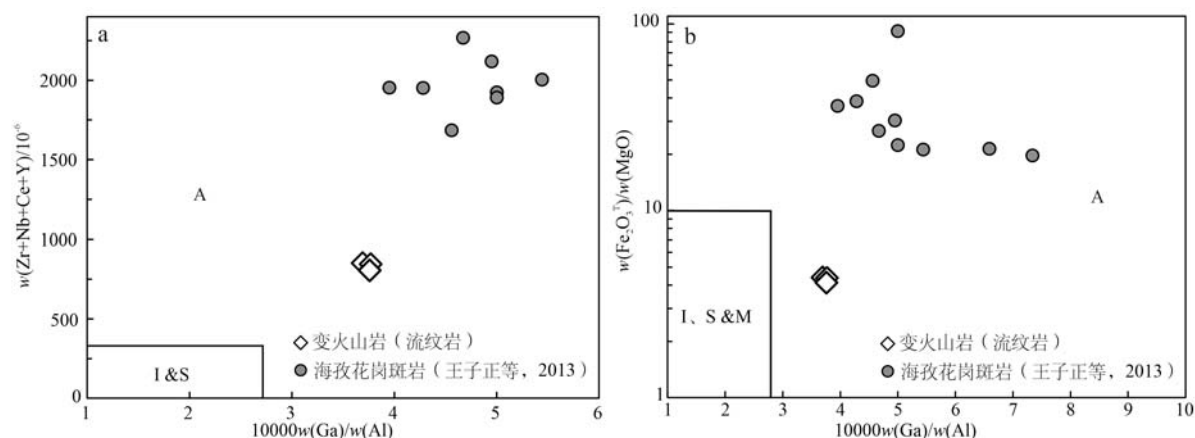


图 13 大红山群老厂河组变火山岩原岩成因判别图解(据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 13 Discrimination diagrams of meta-volcanic rocks from the Laochanghe Formation, Dahongshan Group (after Whalen *et al.*, 1987)

火山岩为过铝质岩石 ($A/\text{CNK} = 1.33 \sim 1.34$)、富集 LILEs 和轻稀土元素、亏损 Nb 和 Ta。 Nb/Ta 值为 $15.49 \sim 17.71$ (平均值 16.12), 介于下地壳 (8.3; Rudnick and Gao, 2014) 和地幔的 (17.7 ; McDonough and Sun, 1995) Nb/Ta 值之间, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-0.88 \sim +3.37$, 多为正值 (尚未发表数据)。因此, 老厂河组变火山岩是壳源岩浆和幔源岩浆相互混合的结果, 可能经地壳重熔产生的壳源岩浆混入一定量的幔源岩浆, 岩浆混合后的酸性岩浆喷出地表结晶而成。

王子正等 (2013) 首次报道了扬子地块西南缘古元古代晚期裂解性事件的酸性岩 (海孜花岗斑岩), 海孜花岗斑岩因具有高 SiO_2 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^T/(\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3^T)$ 和 ΣREE 含量, $A/\text{CNK} = 1.11 \sim 1.25$, $10\,000\text{Ga}/\text{Al} = 3.96 \sim 7.34$, 相对富集 Rb、Th、U 和强烈亏损 Sr、Ba、Ti、Eu 的地球化学特征显示钙碱性过铝质 A 型花岗岩的特点, 并得出扬子地块西南缘存在古元古代晚期与全球性 Columbia 超级大陆裂解同期的酸性岩浆岩的结论。本文研究的大红山群老厂河组变火山岩与王子正等 (2013) 报道的海孜花岗斑岩主量和微量元素特征均为高的 $\text{Fe}_2\text{O}_3^T/(\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3^T)$ 值和 ΣREE 含量、相对富集 Rb、Th、U; 强烈亏损 Sr、Ba、Ti 和 Eu、 $10\,000\text{Ga}/\text{Al}$ 值大于 2.6 以及较高的形成温度, 均属于钙碱性过铝质 A 型岩浆岩。

6.3 大红山群变火山-沉积岩原岩形成时代和变质时代的限定

6.3.1 变火山-沉积岩的原岩形成时代

大量同位素年龄显示大红山群形成于古元古代晚期, 变火山-沉积岩的原岩形成时代为 $1.7 \sim 1.6$

Ga (表 4; Hu *et al.*, 1991; Greentree and Li, 2008; Zhao and Zhou, 2011; 杨红等, 2012; 金廷福等, 2017), 精确测定大红山群地层时代能够为完善扬子地块西南缘前寒武纪年代学格架提供关键证据。大红山群底部地层老厂河组的同位素年龄可限定大红山群早期形成时代, 然而有关老厂河组同位素年代格架特征缺乏精细研究。杨红等 (2012) 通过对大红山群老厂河组的变酸性和变基性火山岩开展锆石 U-Pb 定年, 给出老厂河组的成岩时代跨度较大 ($1\,711 \sim 1\,686\text{ Ma}$), 且锆石年龄多偏离谐和线, 普遍存在 Pb 丢失现象, 测得的原岩年龄无法准确限定老厂河组的沉积时代。此外, 变火山岩与大红山群老厂河组沉积地层接触关系不明 (杨红等, 2012), 文中变火山岩所记录的锆石 U-Pb 年龄能否代表老厂河组的形成时代有待进一步论证。

本文选取的老厂河组变火山岩样品普遍与变沉积岩地层呈互层状产出 (图 2), 开展变火山岩夹层的年代学研究能够准确限定大红山群老厂河组真实的沉积时限。如图 8 所示, 2 件变火山岩样品的锆石核部形态、CL 图像和振荡环带均显示典型的岩浆锆石特征, 这些岩浆锆石核部的 U-Pb 年龄十分集中且均落在谐和线之上。由此可见, 变火山岩的岩浆锆石 U-Pb 年龄 ($1\,711 \pm 6\text{ Ma}$ 和 $1\,713 \pm 6\text{ Ma}$) 可精确限定大红山群老厂河组的沉积时代 (图 11)。此外, 本文测得老厂河组变沉积岩最年轻的一组碎屑锆石加权平均年龄为 $1\,749 \pm 23\text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.71, n = 12$), 该年龄值稍老于变火山岩的岩浆锆石定年结果, 代表着大红山群老厂河组沉积时代的上限。综合上

表 4 前人有关扬子地块西南缘大红山群岩浆和变质年龄数据表

Table 4 Magmatic and metamorphic ages of the Dahongshan Group in the southwestern Yangtze Block

采样地层位	岩石类型	测试方法	年龄/Ma	参考文献
红山组	辉绿岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 659±16	Zhao and Zhou, 2011
红山组	石英钠长斑岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 673±20	金延福等, 2017
红山组	变质辉长岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 643±19	金延福等, 2017
红山组	变质辉长岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	748. 9±5. 7	金延福等, 2017
红山组	变钠质熔岩	锆石 TIMS U-Pb	1 665±13	Hu <i>et al.</i> , 1991
曼岗河组/红山组	变钠质熔岩 白云母角闪片岩	Sm-Nd 等时线	1 657±82	Hu <i>et al.</i> , 1991
曼岗河组	变质凝灰质片岩	锆石 SHRIMP U-Pb	1 675±8	Greentree and Li, 2008
曼岗河组	石英钠长岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 681±13	Zhao and Zhou, 2011
曼岗河组	变火山岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 687±8	吴孔文, 2008
老厂河组	石英岩	锆石 U-Pb	1 900	吴懋德等, 1990
老厂河组	变质中酸性岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 711±4	杨红等, 2012
老厂河组	变质基性岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	1 686±4	杨红等, 2012
老厂河组	变质基性岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	849±12	杨红等, 2012
老厂河组	变沉积岩和变火山岩	白云母 Ar-Ar	845~837	杨红等, 2013
老厂河组	云母片岩	云母 Ar-Ar	860~820	Greentree, 2007
老厂河组	二云母片岩	独居石 U-Th-Pb	845±6	杨朝, 2023

述,大红山群老厂河组变火山-沉积地层的精确沉积时代为 1 713~1 711 Ma。

6.3.2 变沉积岩物源分析

沉积岩中的碎屑锆石是分析沉积物源和研究地壳演化的重要介质(Cawood *et al.*, 2012)。太古宙-古元古代岩石在扬子板块地表出露罕见,大多数被锆石记录其年龄信息(Zhang *et al.*, 2006; 郑永飞等, 2007; Zhao *et al.*, 2010)。大红山群是扬子地块西南缘出露较为完整的古-中古界地层之一(钱锦和等, 1990; 王伟等, 2019),研究大红山群变沉积岩的碎屑锆石 U-Pb 年龄分布特征对于揭示扬子地块西南缘前寒武纪大陆地壳形成与演化的地质历史和证实扬子地块可能存在太古宙地壳基底具有重要意义。

前人研究发现扬子地块西南缘古-中元古界沉积地层(大红山群、河口群、东川群和原通安组)的碎屑锆石均记录了太古宙-古元古代的年龄信息,显示这些沉积地层的碎屑锆石年龄谱相似,具有 1. 9~1. 8 Ga 和 2. 4~2. 1 Ga 的年龄峰值以及 3. 7~2. 7 Ga 的古老锆石信息(Greentree *et al.*, 2006; Greentree and Li, 2008; Zhao *et al.*, 2010; 耿元生等, 2012)。这些结果表明分布于扬子地块西南缘的古-中元古界地层沉积物质来源相似,说明扬子地块西南缘可能存在太古宙-古元古代的地壳基底为其提供沉积的物源。

如图 14 所示,大红山群下部老厂河组与上部曼岗河组和坡头组变沉积岩的碎屑锆石年龄分布特征

十分相似,年龄主要集中于古元古代的两个时期(1. 9~1. 7 Ga 和 2. 4~2. 1 Ga),少量为太古宙时期(3. 0~2. 6 Ga)。由此可知,大红山群的沉积地层应形成于相同的构造背景,物质来源于扬子地块太古宙-古元古代基底。

大红山群年龄为 3. 0~2. 6 Ga 的碎屑锆石说明扬子地块西南缘可能存在太古宙地壳物质。Cui 等(2019, 2020, 2021)识别出一套出露于扬子地块西南缘的早前寒武纪岩石(撮科杂岩),测定撮科杂岩中变花岗质岩石的锆石 U-Pb 年龄为 3. 10~2. 85 Ga,证实扬子地块西南缘的确存在太古宙陆壳结晶基底。这一发现充分证明了大红山群变沉积岩的太古宙碎屑锆石由扬子地块西南缘太古宙基底提供。

大红山群早古元古代(2. 4~2. 1 Ga)的碎屑锆石沉积物源被解释为来自外来块体或未出露的扬子地块基底(Greentree and Li, 2008)。但 Wang 等(2016)在扬子地块西南缘发现早古元古代岩浆事件,锆石同位素定年研究限定了越南北部花岗质片麻岩 2. 28~2. 19 Ga 的岩浆年龄。此外,Kou 等(2017)获得云南大红山矿床围岩变火山岩锆石 U-Pb 年龄为 2 012±7 Ma。Cui 等(2019)报道了云南元江县撮科地区二长花岗岩的结晶年龄为 2 363~2 359 Ma。上述研究均为扬子地块西南缘的早古元古代(2. 5~2. 3 Ga)岩浆活动提供有力证据。因此,大红山群早元古代(2. 4~2. 1 Ga)的碎屑锆石应来源于扬子地块西南缘的早元古代岩浆岩和变质岩。

大红山群古元古代晚期(1. 9~1. 75 Ga)的碎屑

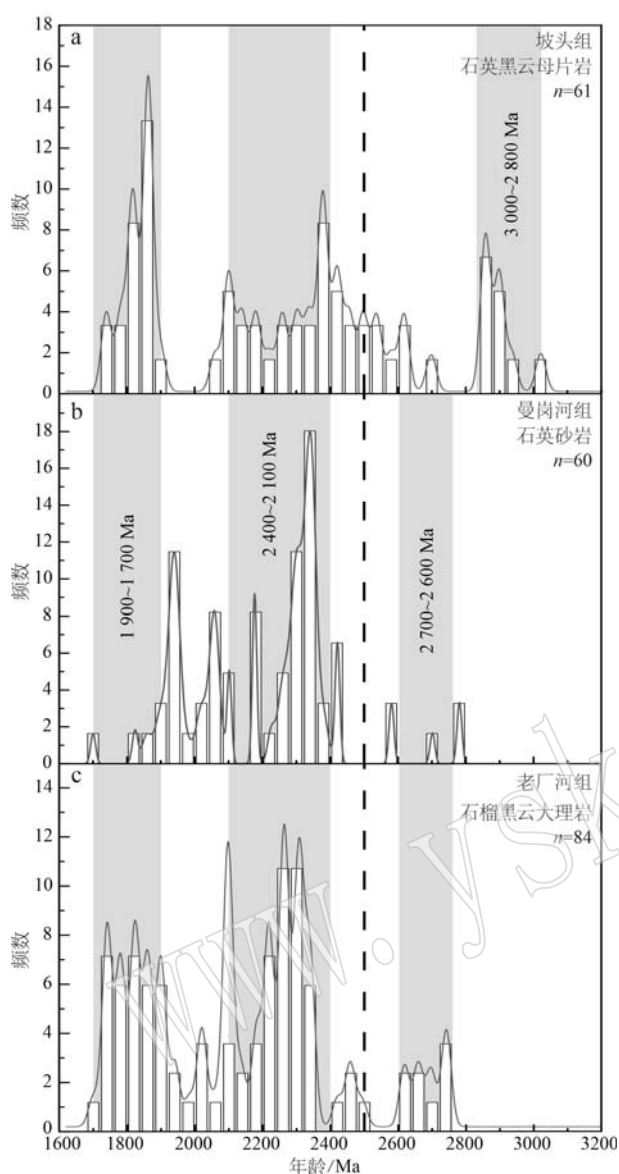


图 14 大红山群变沉积岩的锆石年龄分布直方图

(a、b 数据来源于 Greentree and Li, 2008, c 为本文数据)

Fig. 14 Zircon U-Pb age histograms of meta-sedimentary rocks from the Dahongshan Group (a, b data source Greentree and Li, 2008, data c from this study)

锆石年龄与扬子地块西南缘侵入于撮科杂岩的花岗岩脉侵位时代(1.94~1.89 Ga)一致。此外,越南北部的花岗质片麻岩和撮科地区片麻状花岗岩均保留了~1.95 Ga 和~1.85 Ga 的变质锆石年龄信息(Wang *et al.*, 2016; Cui *et al.*, 2020; 杨朝, 2023)。因此,大红山群 1.9~1.75 Ga 的年龄峰值与扬子地块西南缘的中古元古代岩浆-变质事件关系密切,其物源来自扬子地块西南缘的中古元古代岩浆活动。

综上所述,大红山群变沉积岩碎屑锆石的年龄

分布特征表明沉积物源主要来源于扬子地块西南缘古元古代的岩浆岩,其次是太古宙岩石。大红山群的碎屑锆石年龄信息指示扬子地块西南缘参与 Columbia 超大陆聚合和裂解的响应过程。

6.3.3 变质时代

大红山群属于扬子地块西南缘的前寒武纪结晶基底,岩石均已发生低绿片岩-高角闪岩相变质。前人已对大红山群变火山-沉积岩的变质年龄进行白云母 Ar-Ar 和 K-Ar、独居石 U-Pb 和变质锆石 U-Pb 等多种方法定年研究,但所报道的年龄数据结果跨度较大(杨红等, 2012, 2013; 金廷福等, 2017; 杨朝, 2023),有关大红山群变质时代的年代格架缺乏精细研究,尤其是关于峰期变质时代和退变质时代的厘定。

本文通过对大红山群老厂河组变火山岩的变质锆石进行年代学研究,并将变质锆石 U-Pb 年龄和前人测得的白云母 Ar-Ar 年龄和独居石 U-Th-Pb 年龄综合对比,限定不同变质阶段的年龄时限。老厂河组变火山岩样品的锆石 CL 图像显示具核边结构(图 8),核部显示清晰的岩浆环带,边部锆石无-弱分带且 Th/U 值明显低于核部锆石(图 9),表明锆石边部为变质成因,获得的变质锆石 U-Pb 谐和年龄为 843 ± 5 Ma。

该年龄值与老厂河组变沉积岩的独居石 U-Pb 年龄(845 ± 6 Ma; 杨朝, 2023)和白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄(844.2 ± 4.2 Ma; 杨红等, 2013)、老厂河组变基性岩的变质锆石 U-Pb 年龄(849 ± 12 Ma; 杨红等, 2012)十分相近,稍早于老厂河组变中酸性岩的白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄(839.6 ± 4.2 Ma ~ 837.7 ± 4.2 Ma; 杨红等, 2013)。由于锆石(900℃)和独居石(700~750℃)的 U-Pb 体系封闭温度较高,能准确记录变质作用的峰期年龄(Corfu, 1988; Suzuki and Adachi, 1991; 吴元保等, 2004; Cocherie *et al.*, 2005)。然而白云母 Ar-Ar 同位素体系的封闭温度较低(<450℃; Hames and Bowring, 1994), $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄记录岩石冷却至封闭温度后的年龄。当变质事件的温度不高于封闭温度时, $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄才代表变质年龄。老厂河组变沉积岩的白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄(杨红等, 2013)与变基性岩的锆石 U-Pb 年龄和变沉积岩的独居石 U-Pb 年龄(杨红等, 2012; 杨朝, 2023)相一致,限定大红山群的峰期变质年龄为 849~843 Ma; 老厂河组变中酸性岩的白云母封闭温度可能低于变质事件的温度,测得的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄可

能代表变质后的冷却年龄,限定大红山群的峰后退变质年龄为 839~837 Ma。

6.4 大红山群变火山-沉积岩原岩形成的构造背景及新元古代变质事件性质

6.4.1 变火山-沉积岩原岩形成的构造背景

扬子地块西缘保存了~1.7Ga 非造山裂解事件的地质信息,可能是古-中元古代 Columbia 超大陆的组成部分(尹福光等, 2012)。王伟等(2019)总结古-中元古代扬子西南缘地块经历的岩浆-变质-沉积-成矿等地质事件,重建了扬子地块在 Columbia 的古地理位置,认为扬子地块经历 Columbia 超大陆聚合(2.03~1.81 Ga)后,~1.75 Ga 扬子地块西南缘与 Columbia 超大陆同步开始裂解并形成大陆裂谷,约 1.66~1.60 Ga 扬子地块西南缘和 Columbia 超大陆主体分离。

大红山群位于扬子地块西南缘,其古-中元古代沉积-岩浆-变质-成矿地质事件记录可反映与 Columbia 超大陆聚合和裂解的关联。由于大红山群变火山-沉积岩原岩遭受热液蚀变和多期构造变形变质改造(钱锦和等, 1990; 徐启东, 1998),有关大红山群的原岩构造环境存在不同认识。前人利用岩石地球化学的方法恢复大红山群形成时的构造环境,发现大红山群变基性岩原岩归属板内拉斑玄武岩,形成于大陆裂谷环境,岩浆来源于不均匀岩石地幔(刘肇昌等, 1995; 徐启东, 1998; 杨红等, 2014; 戚金栋, 2016)。有关大红山群 1.7~1.6 Ga 构造岩浆事件所反映的地质过程也存在多种解释。Greentree 和 Li (2008)认为大红山群变沉积岩的碎屑锆石特征以及变沉积岩、石英岩、碳酸盐岩和复成分砾岩的岩石组合表明其沉积于靠近大陆边缘或者陆内环境,并非形成于洋中脊环境(徐启东, 1998)。张鸿翔等(2001)提出由于早元古代时期古大洋向东北俯冲,与扬子古陆发生碰撞产生弧盆俯冲体系,而大红山群形成于弧后盆地进一步拉张的构造环境。主流观点认为以东川群、大红山群、河口群和通安组为代表的古-中元古界(<~1.75 Ga)沉积地层至少从 1.75 Ga 开始进入陆内拉张的构造环境,和 Columbia 超大陆同时开始裂解,可能是扬子地块西南缘响应 Columbia 超大陆的聚合和裂解(杨红等, 2014; 王伟等, 2019)。

本文根据大红山群老厂河组的变沉积岩碎屑锆石年龄和变火山岩原岩地球化学属性和元素地球化学图解综合判别其原岩形成环境。据 Barham 等

(2022),碎屑锆石年龄群的第 10 个百分位至第 50 个百分位年龄差值($10^{th} \sim 50^{th}$)和与分析碎屑锆石年龄形态和离散有关的卡方分布(χ^2)两个指标为区分活动/汇聚和被动/离散板块边缘构造背景提供有力的手段。经计算得出大红山群坡头组、曼岗河组和老厂河组($10^{th} \sim 50^{th}$)/ χ^2 值分别为 203.3、83.5 和 130.0(表 5),均处于被动/离散的区域,其中曼岗河组和坡头组的碎屑锆石年龄数据来自 Greentree 和 Li (2008)。在($10^{th} \sim 50^{th}$)- χ^2 图解中(图 15),大红山群变沉积岩的 3 组碎屑锆石均落在离散构造背景。

表 5 大红山群变沉积岩碎屑锆石 $10^{th} \sim 50^{th}$ 百分位年龄差值和 χ^2 年龄分布计算结果

Table 5 Calculation results of $10^{th} \sim 50^{th}$ percentile of the age population and χ^2 population distribution of meta-sedimentary rocks from the Dahongshan Group

采样地层位	岩石类型	$10^{th} \sim 50^{th}/Ma$	$\chi^2 (10^{th} \sim 50^{th})/\chi^2$
坡头组	石英黑云母片岩	462	2
曼岗河组	石英砂岩	331	4
老厂河组	石榴黑云大理岩	410	3

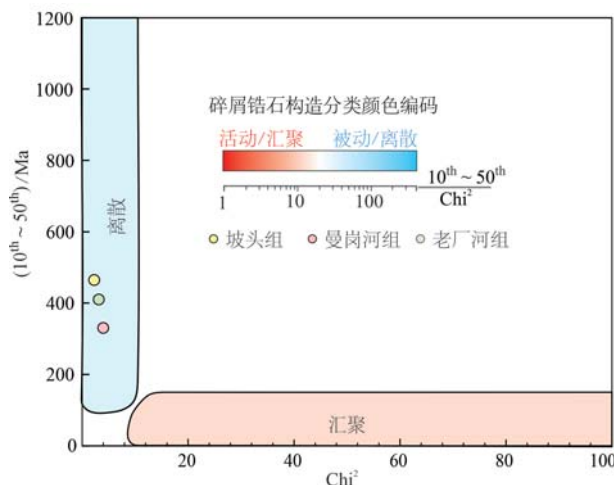


图 15 大红山群变沉积岩的构造判别图解(据 Barham *et al.*, 2022)

Fig. 15 Tectonic discrimination diagrams of meta-sedimentary rocks from the Dahongshan Group (after Barham *et al.*, 2022)

在 Hf-Zr 图解(图 16a)中,变火山岩样品全部落在伸展盆地火山岩区域内,表现出高 Zr 和 Hf 的特征; $Al_2O_3-SiO_2$ 图解显示样品形成于与裂谷有关的构造环境(图 16b); 在 Nb-Y 图解(图 16c)和 Rb-Hf-Ta 图解(图 16d)中,样品落在板内环境。据 Eby (1992), $Sc/Nb-Y/Nb$ 、 $Nb-Y-Ce$ 和 $Nb-Y-3Ga$ 图解(图 16e~16g)可将 A 型花岗岩区分为 A_1 型和 A_2 型

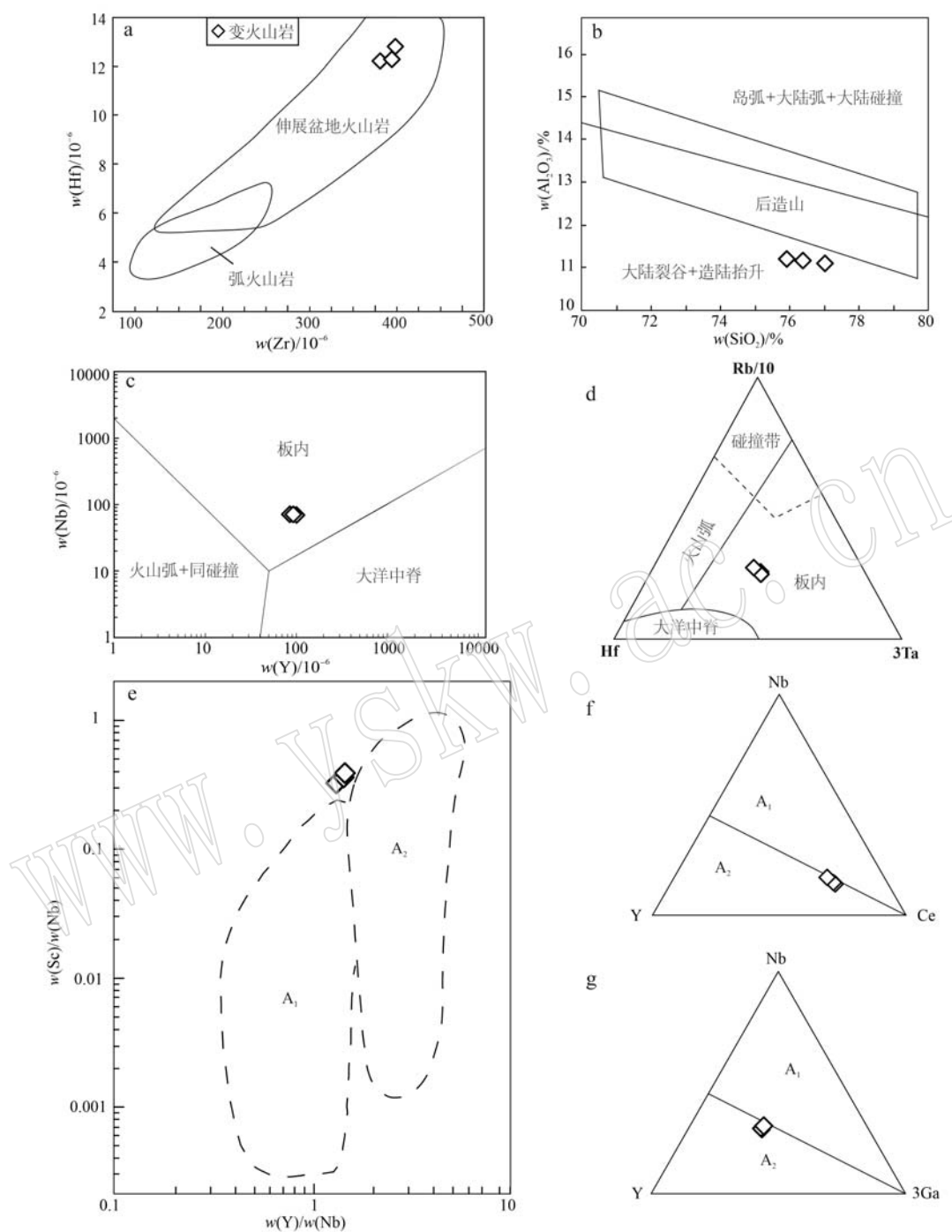


图 16 大红山群老厂河组变火山岩的构造判别图解(a 据 Condie, 1986; b 据 Harris *et al.*, 1986; c、d 据 Pearce *et al.*, 1984; e、f、g 据 Eby, 1992)

Fig. 16 Tectonic discrimination diagrams of meta-volcanic rocks from the Laochanghe Formation, Dahongshan Group (a after Condie, 1986; b after Harris *et al.*, 1986; c, d after Pearce *et al.*, 1984; e, f, g after Eby, 1992)

两类,其中 A_1 型花岗岩代表侵位于大陆裂谷或板内的非造山环境, A_2 型花岗岩形成于陆-陆碰撞后或造山后环境。本文研究的变火山样品基本落在 A_2 或是靠近 A_2 的区域,表明变火山岩形成于造山后的裂谷伸展环境。

综上所述,本文大红山群老厂河组变沉积岩原岩形成于被动大陆边缘的构造背景,变火山岩形成于造山后的大陆裂谷拉张环境。本文研究的变火山岩为形成于 1 713~1 711 Ma 的 A_2 型流纹岩,与扬子地块西缘海孜花岗斑岩(王子正等, 2013)的形成环

境十分相近,说明 Columbia 超大陆~1.75 Ga 裂解拉伸期的酸性岩浆活动在扬子地块西南缘的大红山群同样存在。因此,大红山群老厂河组变火山-沉积岩原岩形成于扬子地块西南缘~1.75 Ga 响应 Columbia 超大陆裂解的动力学环境。

6.4.2 重要变质事件的性质及其对扬子地块西南缘前寒武纪构造演化的意义

大红山群变质岩石以变火山-沉积岩为主,前人对老厂河组变火山-沉积岩的变质作用性质和变质演化开展了相关研究工作(曹德斌,1997;杨朝,2023)。通过对老厂河组变质泥质岩和变质基性岩开展变质矿物组成、矿物组合和组构厘定以及石榴子石和黑云母矿物对研究,划分出两期变质作用:吕梁期变质作用表现为中压相系的区域变质作用,变质相为低绿片岩相-低角闪岩相,峰期变质温度为500℃,压力为0.5 GPa;晋宁期变质作用以具强烈变形为特征,属低绿片岩相的区域低温动力变质作用(曹德斌,1997)。老厂河组含十字蓝晶石石榴二云母片岩的峰期矿物组合为 Grt-Ky-Bt-Ms-Pl-St-Ilm-Rt-Q,峰期变质温压条件达680℃和0.82~0.87 GPa,峰后退变质阶段为近等温降压过程,标志为蓝晶石退变质转变为白云母,变质演化 p - T 轨迹为近等温降压的顺时针形式,记录新元古代地壳碰撞加厚后快速折返的过程(杨朝,2023)。上述研究表明大红山群记录了顺时针型式的 p - T 轨迹,变质程度可达角闪岩相,峰期变质温压条件为680℃和0.82~0.87 GPa,说明大红山群变质事件发生于碰撞造山的动力学背景下。

结合前人研究结果表明大红山群经历了850~750 Ma 的中压相变质作用(曹德斌,1997;杨红等,2013;金廷福等,2017;杨朝,2023)。杨朝(2023)研究认为~850 Ma 大红山群变泥质岩的近等温降压顺时针 p - T 轨迹记录了扬子地块西缘同 Seychelles 和西印度板块持续发生俯冲并折返的演化过程。然而扬子地块西缘康滇地区850~740 Ma 岩浆活动形成的构造环境具有较大争议。主要是两种观点:① 康滇地区是洋壳向东俯冲形成的岛弧,即形成现在南北向带状分布的岩浆弧(颜丹平等,2002;Zhou *et al.*, 2002a, 2002b, 2006a, 2006b; 沈渭洲等,2002a, 2002b, 2003; 耿元生等,2007, 2008); ② 与 Rodinia 超大陆裂解有关,形成于地幔柱引起的板内裂谷构造背景下(Li Z X *et al.*, 1995, 1999, 2003; 李献华等,2001, 2002; Li X H *et al.*, 2002,

2006)。因此,扬子地块西南缘大红山群约850~750 Ma 的区域变质事件可能反映陆内俯冲碰撞造山或是先裂谷-后碰撞造山的构造演化过程。而扬子地块西南缘大红山群变质岩石完整地记录了康滇地区新元古代岩浆活动引发的850~750 Ma 岩浆-变质热事件,深入开展系统研究其变火山-沉积岩的变质演化 p - T 轨迹可为揭示扬子地块的地质演化历史和新元古代岩浆活动的构造动力学背景提供重要的证据支持。

7 主要结论

(1) 大红山群老厂河组变沉积岩原岩为成熟度较高的泥岩/页岩,沉积物源主要来源于酸性岩浆岩,源区物质风化程度较高,未经历沉积再循环,其微量-稀土配分模式与平均上地壳成分相似。

(2) 大红山群老厂河组变火山岩原岩化学成分相当于钙碱性过铝质 A 型流纹岩,可能是壳源岩浆和幔源岩浆相互混合的结果,形成于造山后的大陆裂谷拉张环境。

(3) 大红山群老厂河组变火山-沉积岩锆石 U-Pb 年龄精确限定原岩形成时代为1713~1711 Ma。综合前人研究成果限定大红山群沉积地层变质事件的峰期变质年龄为849~843 Ma,峰后退变质年龄为839~837 Ma。

(4) 大红山群变沉积岩碎屑锆石的年龄峰值为2.4~2.1 Ga 和1.9~1.75 Ga,最年轻的一组碎屑锆石年龄限定最老沉积时限为~1.75 Ga。变沉积岩沉积物源主要来源于扬子地块西南缘的太古宙和早-中古元古代结晶基底。

(5) 扬子地块西南缘大红山群变火山-沉积岩保存了~1.7 Ga 非造山裂解的岩浆活动,849~837 Ma 的新元古代变质事件可能与 Rodinia 超大陆聚合和裂解密切相关。

致谢 感谢审稿老师和编辑老师认真审阅本文,并提出细致且严谨的宝贵意见。

References

- Anderson J L. 1983. Proterozoic anorogenic granite plutonism of North America [J]. Geological Society of America Memoir, 161: 133~154.

- Bai Jin and Zhang Xueqi. 1981. The Structure of the Dahongshan Ore District and the Dahongshan Group [M]. Bulletin of the Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, 3: 103~116 (in Chinese with English abstract).
- Barham M, Kirkland C L and Handoko A D. 2022. Understanding ancient tectonic settings through detrital zircon analysis [J]. Earth and Planetary Science Letters, 583: 117~125.
- Barker F, Wones D R, Sharp W N, *et al.* 1975. The Pikes Peak Batholith, Colorado Front Range, and a model for the origin of the gabbro-anorthosite-syenite-potassic granite suite [J]. Precambrian Research, 2(2): 97~160.
- Becker H, Jochum K P and Carlson R W. 2000. Trace element fractionation during dehydration of eclogites from high-pressure terranes and the implications for element fluxes in subduction zones [J]. Chemical Geology, 163 (1-4): 65~99.
- Black L P, Kamo S L, Aleikoff J J, *et al.* 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology [J]. Chemical Geology, 200(1~2): 155~170.
- Cao Debin. 1997. Metamorphism characteristics of Dahongshan rock group in the Nangan-Xilahe area [J]. Yunnan Geology, 16(2): 184~191 (in Chinese with English abstract).
- Cawood P A, Hawkesworth C J and Dhuime B. 2012. Detrital zircon record and tectonic setting [J]. Geology, 40(10): 875~878.
- Cawood P A, Wang W, Zhao T, *et al.* 2020. Deconstructing South China and consequences for reconstructing Nuna and Rodinia [J]. Earth-Science Reviews, 204: 103~169.
- Cawood P A, Wang Y, Xu Y, *et al.* 2013. Locating South China in Rodinia and Gondwana: A fragment of greater India lithosphere? [J]. Geology, 41: 903~906.
- Cawood P A, Zhao G C, Yao J, *et al.* 2018. Reconstructing South China in Phanerozoic and Precambrian supercontinents [J]. Earth-Science Reviews, 186: 173~194.
- Chen Haoshou and Ran Chongying. 1992. Isotope Geochemistry of Copper Deposits in Kangdian Axis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 7~74 (in Chinese with English abstract).
- Chen W T, Zhou M T and Zhao X F. 2013. Late Paleoproterozoic sedimentary and mafic rocks in the Hekou area, SW China: Implication for the reconstruction of the Yangtze Block in Columbia [J]. Precambrian Research, 231: 61~77.
- Clemens J D, Holloway J R and White A J R. 1986. Origin of an A type granite: Experimental constraints [J]. American Mineralogist, 71(3~4): 317~324.
- Cocherie A, Mezeme B E, Legendre O, *et al.* 2005. Electron-microprobe dating as a tool for determining the closure of Th-U-Pb systems in migmatitic monazites [J]. American Mineralogist, 90(4): 607~618.
- Collins W J, Beams S, White A J R, *et al.* 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 80(2): 189~200.
- Condie K C. 1986. Geochemistry and tectonic setting of early Proterozoic supracrustal rocks in the southwestern United States [J]. The Journal of Geology, 94(6): 845~864.
- Condie K C. 1993. Chemical composition and evolution of the upper samples and continental crust: Contrasting results from surface shales [J]. Chemical Geology, 104(1~4): 1~37.
- Corfu F. 1988. Differential response of U-Pb systems in coexisting accessory minerals, Winnipeg River Subprovince, Canadian Shield. Implications for Archean crustal growth and stabilization [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 98(3): 312~325.
- Cox R, Lowe D R and Collers R L. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59(14): 2919~2940.
- Cui X Z, Wang J, Ren G M, *et al.* 2020. Paleoproterozoic tectonic evolution of the Yangtze Block: New evidence from ca. 2.36 to 2.22 Ga magmatism and 1.96 Ga metamorphism in the Cuoke Complex, SW China [J]. Precambrian Research, 337: 105~125.
- Cui X Z, Wang J, Sun Z M, *et al.* 2019. Early Paleoproterozoic (ca. 2.36 Ga) post-collisional granitoids in Yunnan, SW China: Implications for linkage between Yangtze and Laurentia in the Columbia supercontinent [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 169: 308~322.
- Cui X Z, Wang J, Wang X C, *et al.* 2021. Early crustal evolution of the Yangtze Block: Constraints from zircon U-Pb-Hf isotope systematics of 3.1~1.9 Ga granitoids in the Cuoke Complex, SW China [J]. Precambrian Research, 357: 106~155.
- Deng Qi, Ren Guangming, Ning Kuobu, *et al.* 2023. Re-definition of depositional age and tectonic attribute for the Hekou Group from southwestern Yangtze block: A discussion on the Mesoproterozoic ocean plate stratigraphy [J]. Acta Geologica Sinica, 97(2): 325~338 (in Chinese with English abstract).
- Dickinson A P. 1994. Nd isotope chemistry of Tertiary igneous from Arran, Scotland: Implications for magma evolution and crustal structure [J]. Geological Magazine, 131(3): 329~333.
- Dickinson A P, Halliday A N and Bowden P. 1991. A Pb, Sr and Nd isotope study of the basement and Mesozoic ring complexes of the Jos plateau, Nigeria [J]. Chemical Geology, 94(1): 23~32.

- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculation on their petrogenesis [J]. *Lithos*, 26(1~2): 115~134.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*, 20(7): 641~644.
- Floyd P A and Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones [J]. *Journal of the Geological Society*, 144(4): 531~542.
- Frost C D and Frost B R. 2011. On ferroan (A-type) granitoids: Their compositional variability and modes of origin [J]. *Journal of Petrology*, 52(1): 39~53.
- Geng Yuansheng, Liu Yongqing, Gao Linzhi, *et al.* 2012. Geochronology of the mesoproterozoic Tongan Formation in southwestern margin of Yangtze Craton: New evidence from zircon LA-ICP-MS U-Pb ages [J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1 479~1 490 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, *et al.* 2007. Age of crystalline basement in western margin of Yangtze Terrane [J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 429~441 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, *et al.* 2008. Metamorphic Basement Evolution in Western Margin of Yangtze Block [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~215 (in Chinese).
- Greentree M R. 2007. Tectonostratigraphic Analysis of the Proterozoic Kangdian Iron Oxide-copper Province, Southwest China [D]. Ph. D. Thesis, University of Western Australia, 284.
- Greentree M R and Li Z X. 2008. 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*, 33 (5~6): 289~302.
- Greentree M R, Li Z X, Li X H, *et al.* 2006. 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*, 151(1~2): 79~100.
- Hames W E and Bowring S A. 1994. An empirical evaluation of the argon diffusion geometry in muscovite [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 124(1~4): 161~169.
- Harris N B W, Pearce J A and Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 19(1): 67~81.
- Hayashi K I, Fujisawa H, Holland H D, *et al.* 1997. Geochemistry of 1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(19): 4 115~4 137.
- Herron M M. 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 58(5): 820~829.
- Hu A Q, Zhu B Q, Mao C X, *et al.* 1991. Geochronology of the Dahongshan Group [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 10(3): 195~203.
- Irvine T N and Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification rocks [J]. *Canada Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523~548.
- Jackson N J, Walsh J N and Pegram E. 1984. Geology, geochemistry and petrogenesis of late Precambrian granitoids in the central Hicaz region of the Arabian shield [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 87: 205~219.
- Jin Tingfu, Li Youguo, Fei Guangchun, *et al.* 2017. Geochronology of zircon U-Pb from Hongshan formation in the Dahongshan Group in the Southwest Yangtze Block for the redefinitions of the forming age of the protolith and metamorphic age [J]. *Geology Review*, 63(4): 894~910 (in Chinese with English abstract).
- Kerr A and Fryer B J. 1993. Nd isotope evidence for crust-mantle interaction in the generation of A-type granitoid suites in Labrador, Canada [J]. *Chemical Geology*, 104(1~4): 39~60.
- King P L, White A J R and Chappell B W. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia [J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371~391.
- Kou C H, Zhang Z C, Santosh M, *et al.* 2017. Oldest volcanic-hosted submarine iron ores in South China: Evidence from zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Paleoproterozoic Dahongshan iron deposit [J]. *Gondwana Research*, 49: 182~204.
- Li X H, Li Z X, Zhou H, *et al.* 2002. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: Implications for the initial rifting of Rodinia [J]. *Precambrian Research*, 113(1~2): 135~155.
- Li X H, Li Z X and Sinclair A J. 2006. Revisiting the "Yanbian Terrane: Implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze Block, South China [J]. *Precambrian Research*, 151(1~2): 14~30.
- Li Xianhua, Li Wuxian and He Bin. 2012. 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*, 31(6): 529~546 (in

- Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Li Zhengxiang, *et al.* 2001. Zircon U-Pb age and petrochemical characteristics of the Neoproterozoic bimodal volcanics from western Yangtze block [J]. *Geochimica*, 30(4): 315~322 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Li Zhengxiang, *et al.* 2002. Petrogenesis of Neoproterozoic bimodal volcanics in western Sichuan and its tectonic implications: Geochemical and Sm-Nd isotopic constraints [J]. *Chinese Journal of Geology*, 37(3): 264~276 (in Chinese with English abstract).
- Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, *et al.* 2008a. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis [J]. *Precambrian Research*, 160(1~2): 179~210.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, *et al.* 1999. The break up of Rodinia: Did it start with a mantle the plume beneath South China? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 173(3): 171~181.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, *et al.* 2003. 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*, 122(1~4): 85~109.
- Li Z X, Li X H, Li W X, *et al.* 2008b. Was Cathaysia part of Proterozoic Laurentia? —New data from Hainan Island, south China [J]. *Terra Nova*, 20(2): 154~164.
- Li Z X, Zhang L H, Powell CM, *et al.* 1995. South China in Rodinia: Part of the missing link between Australia—East Antarctica and Laurentia? [J]. *Geology*, 23(5): 407~410.
- Liu Zhaochang, Li Fanyou, Zhong Kanghui, *et al.* 1995. The rift (depression) and metallogenesis of the western margin of the Yangtzi platform and its neighbouring region [J]. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 4(2): 70~76 (in Chinese with English abstract).
- Loiselle M C and Wones D R. 1979. Characteristics of anorogenic granites [J]. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 11: 468.
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3. 00, a geochronology toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley: Berkeley Geochronological Center Special Publication.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 120(3~4): 223~253.
- McLennan S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary: Influence of provenance and sedimentary processes [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21(1): 169~200.
- McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, *et al.* 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics [C]//Johnsson M J and Basu A. *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. 284: 21~40.
- Merdith A S, Collins A S, Williams S E, *et al.* 2017. A full-plate global reconstruction of the Neoproterozoic [J]. *Gondwana Research*, 50: 84~134.
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, *et al.* 2008. Zircon M257—a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of Zircon [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32(3): 247~265.
- Nesbitt H W and Young C M. 1989. Formation and diagenesis weathering profiles [J]. *The Journal of Geology*, 97(2): 129~147.
- Nesbitt H W and Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 299(5 885): 715~717.
- Paton C, Woodhead J D, Hellstrom J C, *et al.* 2010. Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(3): Q0AA06.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element distribution diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- Pisarevsky S A and Natapov L M. 2003. Siberia and Rodinia [J]. *Tectonophysics*, 375(1~4): 221~245.
- Qi Jindong. 2016. Study on the Geochemical Characteristics of Metamorphic Volcanic Rocks in the Dahongshan Group [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 1~80 (in Chinese with English abstract).
- Qian Jinhe and Shen Yuanren. 1990. Dahongshan Copper Iron Ore Deposit Associated with Paleovolcanic Rocks, Yunnan [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~183 (in Chinese).
- Rogers J and Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent [J]. *Gondwana Research*, 5(1): 5~22.
- Rudnick R L and Gao S. 2003. The composition of the continental crust [C]//Rudnick R L. *The Crust*. Elsevier-Pergamon, Oxford: 1~64.
- Rudnick RL and Gao S. 2014. 4. 1~Composition of the Continental Crust [C]//Heinrich D, Holland K K. *Turekian, Treatise on Geochemistry (Second Edition)*, Elsevier: 1~51.
- Sadofsky S J and Bebout G E. 2003. Record of forearc devolatilization in low-*T*, high-*P/T* metasedimentary suites: Significance for models of convergent margin chemical cycling [J]. *Geochemistry, Geophysics*

- ics, *Geosystems*, 4(4): 9 003.
- Sang Longkang and Ma Changqian. 2012. *Petrology* 2nd Edition [M]. Beijing: Geological Publishing House, 6 (in Chinese).
- Shen Qihan. 2009. A systematic list of mineral abbreviations is recommended [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 495~500 (in Chinese with English abstract).
- Shen Weizhou, Gao Jianfeng, Xu Shijin, *et al.* 2002a. Geochemical characteristics and genesis of the Qiaotou Basic complex, Luding County, Western Yangtze Block [J]. *Geological Journal of China Universities*, 8(4): 380~389 (in Chinese with English abstract).
- Shen Weizhou, Gao Jianfeng, Xu Shijin, *et al.* 2003. Geochemical characteristics of the Shimian Ophiolite, Sichuan Province and its tectonic significance [J]. *Geological Review*, 12(1): 17~27 (in Chinese with English abstract).
- Shen Weizhou, Xu Shijin, Gao Jianfeng, *et al.* 2002b. Sm-Nd age and Nd-Sr isotopic characteristics of the Shimian Ophiolite in Sichuan Province [J]. *Science Bulletin*, 47(20): 1 592~1 595 (in Chinese).
- Simonen A. 1953. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofennidic, Early Archean supracrustal rocks in southwestern Finland [J]. *Bulletin de la Commission Géologique de Finlande*, 160: 1~64.
- Sun Kexiang, Li Zhiwei, Yang Xikang, *et al.* 1993. Horizons of Chahe metamorphic rock assemblage of middle to high-grade in Yuanjiang county [J]. *Yunnan Geology*, 12(1): 21~30 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313~345.
- Suzuki K and Adachi M. 1991. Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrane, Northeast Japan, revealed by the chemical Th-U-total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime [J]. *Geochemical Journal*, 25(5): 357~376.
- Taylor S R and McClelland S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution. An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks* [M]. Oxford, UK: Blackwell Scientific, 1~312.
- Taylor S R. 1965. *Physics and Chemistry of the Earth*, VI [M]. Pergamon Press, 135~200.
- Turner S P, Foden J D and Morrison R S. 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge South Australia [J]. *Lithos*, 28(2): 151~179.
- Wang Wei, Lu Guimei, Huang Sifang, *et al.* 2019. Geological evolution of the Yangtze Block in Paleo-to Meso-Proterozoic and its implication on the reconstruction of the Columbia supercontinent [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 38(1): 30~52 (in Chinese with English abstract).
- Wang W and Zhou M F. 2014. 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 [J]. *Columbia Tectonophysics*, 610: 110~127.
- Wang W, Cawood P A, Zhou M F, *et al.* 2016. Paleoproterozoic magmatic and metamorphic events link Yangtze to northwest Laurentia in the Nuna supercontinent [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 433: 269~279.
- Wang Zizheng, Guo Yang, Yang Bin, *et al.* 2013. Discovery of the 1.73 Ga Haizi anorogenic type granite in the western margin of Yangtze Craton, and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(9): 931~942 (in Chinese with English abstract).
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in variety of crustal magma types [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295~304.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407~419.
- Wickham S M, Litvinovsky B A, Zanilevich A N, *et al.* 1995. Geochemical evolution of Phanerozoic magmatism in Transbaikalia, East Asia: A key constraint on the origin of K-rich silicic magmas and the process of cratonization [J]. *Journal of Geophysical Research*, 100(B8): 15 641~15 654.
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe [C]//Mckibben M A, Shanks W C and Ridley W I. *Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. Reviews in Economic Geology*, 7: 1~35.
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. *Chemical Geology*, 20: 325~343.
- Wu Kongwen. 2008. *A Study on Geochemistry and Ore-forming Mechanism of the Dahongshan Stratiform Copper Deposit in Yunnan Province* [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Wu Maode, Duan Jinsun and Song Xueliang. 1990. *Geology of the Kunyang Group in Yunnan* [M]. Kunming: Yunnan Science and Tech-

- nology Publishing House, 1~200 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age [J]. *Science Bulletin*, 49(16): 1589~1604 (in Chinese with English abstract).
- Xu Qidong. 1998. Original petrology and tectonic setting of meta-volcanic rocks from Dahongshan Group, Central Yunnan [J]. *Geochimica*, 27(5): 422~431 (in Chinese with English abstract).
- Yan Danping, Zhou Meifu, Song Honglin, *et al.* 2002. Where was south China located in the reconstruction of Rodinia? [J]. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 249~256 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hong, Liu Fulai, Du Lilin, *et al.* 2012. 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*, 28(9): 2994~3014 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hong, Liu Fulai, Liu Pinghua, *et al.* 2013. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating for muscovite in garnet muscovite felsic schists of the Dahongshan Group in southwestern Yangtze Block and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2161~2170 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hong, Liu Pinghua, Meng En, *et al.* 2014. Geochemistry and its tectonic implications of metabasite in the Dahongshan Group in southwestern Yangtze block [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 3021~3033 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhao. 2023. Archean to Proterozoic Magmatic-metamorphic Histories of the Cuoke Complex and Dahongshan Group of SW Yangtze with Implications to Proterozoic Supercontinents [D]. China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Yin Fuguang, Sun Zhiming, Ren Guangmin, *et al.* 2012. Geological record of Paleo- and Mesoproterozoic orogenesis in the western margin of upper Yangtze Block [J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(12): 1917~1932 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongxiang, Liu Congqiang, Xu Zhifang, *et al.* 2001. Geochemical evidence of the lower proterozoic subduction system at the western margin of the Yangtze plate ——The trace element geochemical study of related Metamorphic basaltic rocks [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 21(2): 231~238.
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, *et al.* 2006. Zircon isotope evidence for ≥ 3.5 Ga continental crust in the Yangtze craton of China [J]. *Precambrian Research*, 146(1~2): 16~34.
- Zhang Xuecheng. 1995. The volcanism of Kang-Dian rift zone and characteristics of its calkali (sodic) volcanic rock series [J]. *Yunnan Geology*, 14(2): 81~98 (in Chinese with English abstract).
- Zhao G C and Cawood P A. 1999. Tectonothermal evolution of the Mayuan assemblage in the Cathaysia Block; Implications for Neoproterozoic collision-related assembly of the South China craton [J]. *American Journal of Science*, 299(4): 309~339.
- Zhao G C and Cawood P A. 2012. Precambrian geology of China [J]. *Precambrian Research*, 222~223: 13~54.
- Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, *et al.* 2002. Review of global 2.1~1.8 Ga orogens; Implications for a pre-Rodinia supercontinent [J]. *Earth-Science Review*, 59(1~4): 125~162.
- Zhao X F. 2010. Paleoproterozoic Crustal Evolution and Fe-Cu Metallogeny of the Western Yangtze Block, SW China [D]. Hong Kong: The University of Hong Kong: 1~192.
- Zhao X F and Zhou M F. 2011. Fe-Cu deposits in the Kangdian region, SW China: A Proterozoic IOCG (iron-oxide-copper-gold) metallogenic province [J]. *Mineralium Deposita*, 46(7): 731~747.
- Zhao X F, Zhou M F, Li J W, *et al.* 2010. Late Paleoproterozoic to early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China; Implications for tectonic evolution of the Yangtze Block [J]. *Precambrian Research*, 182(1~2): 57~69.
- Zheng Yongfei and Zhang Shaobing. 2007. Formation and evolution of the Precambrian continental crust in South China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(1): 1~10 (in Chinese).
- Zhou M F, Kennedy A K, Sun M, *et al.* 2002a. Neoproterozoic arc-related mafic intrusions along the northern margin of South China; Implications for the accretion of Rodinia [J]. *The Journal of Geology*, 110(5): 611~618.
- Zhou M F, Ma Y, Yan D P, *et al.* 2006a. The Yanbian terrane (Southern Sichuan province, SW China): A Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze block [J]. *Precambrian Research*, 144(1~2): 19~38.
- Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, *et al.* 2002b. 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(1~2): 51~67.
- Zhou M F, Yan D P, Wang C L, *et al.* 2006b. Subduction related origin of the 750 Ma Xuelongbao adakitic complex (Sichuan Province, China): Implications for the tectonic setting of the giant Neoproterozoic magmatic event in South China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 248: 286~300.
- Zhou M F, Zhao X F, Chen W T, *et al.* 2014. Proterozoic Fe-Cu metallogeny and supercontinental cycles of the southwestern Yangtze Block, southern China and northern Vietnam [J]. *Earth-Science*

Reviews, 139: 59~82.

附中文参考文献

- 白瑾, 张学祺. 1981. 云南省大红山矿区构造和大红山群的划分 [M]. 中国地质科学院天津地质矿产研究所刊 第3号, 103~116.
- 曹德斌. 1997. 南甘-西拉河地区大红山岩群的变质作用特征[J]. 云南地质, 16(2): 184~191.
- 邓奇, 任光明, 宁括步, 等. 2023. 扬子陆块西南缘河口群沉积时限和构造属性的再厘定: 兼论中元古代洋板块地层[J]. 地质学报, 97(2): 325~338.
- 耿元生, 柳永清, 高林志, 等. 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[J]. 地质学报, 86(9): 1479~1490.
- 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 等. 2007. 扬子地台西缘结晶基底的时代[J]. 高校地质学报, 13(3): 429~441.
- 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 等. 2008. 扬子地台西缘变质基底演化 [M]. 北京: 地质出版社, 1~215.
- 金廷福, 李佑国, 费光春, 等. 2017. 扬子地台西南缘大红山群红山组的锆石 U-Pb 年代学研究——对其原岩形成时代和变质时代的再限定[J]. 地质论评, 63(4): 894~910.
- 李献华, 李武显, 何斌. 2012. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合-裂解[J]. 矿物岩石地球化学通报, 31(6): 529~546.
- 李献华, 周汉文, 李正祥, 等. 2001. 扬子地块西缘新元古代双峰式火山岩的锆石 U-Pb 年龄和岩石化学特征[J]. 地球化学, 30(4): 315~322.
- 李献华, 周汉文, 李正祥, 等. 2002. 川西新元古代双峰式火山岩成因的微量元素和 Sm-Nd 同位素制约及其大地构造意义[J]. 地质科学, 37(3): 264~276.
- 刘肇昌, 李凡友, 钟康惠, 等. 1995. 扬子地台西缘及邻区裂谷(陷)构造与金属成矿[J]. 有色金属矿产与勘查, 4(2): 70~76.
- 戚金栋. 2016. 滇中大红山地区大红山群变质火山岩岩石地球化学特征研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 1~80.
- 钱锦和, 沈远仁. 1990. 云南大红山古火山岩铁铜矿[M]. 北京: 地质出版社, 1~183.
- 桑隆康, 马昌前. 2012. 岩石学第2版[M]. 北京: 地质出版社, 6.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. 岩石矿物学杂志, 28(5): 495~500.
- 沈渭洲, 高剑峰, 徐士进, 等. 2002a. 扬子板块西缘泸定桥头基性杂岩体的地球化学特征和成因[J]. 高校地质学报, 8(4): 380~389.
- 沈渭洲, 高剑峰, 徐士进, 等. 2003. 四川石棉蛇绿岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 地质论评, 49(1): 17~27.
- 沈渭洲, 徐士进, 高剑峰, 等. 2002b. 四川石棉蛇绿岩套的 Sm-Nd 年龄及 Nd-Sr 同位素特征[J]. 科学通报, 47(20): 1592~1595.
- 孙克祥, 李志伟, 杨锡康, 等. 1993. 元江岔河中-深变质岩系的特征及层位归属[J]. 云南地质, 12(1): 21~30.
- 王伟, 卢桂梅, 黄思坊, 等. 2019. 扬子陆块古-中元古代地质演化与 Columbia 超大陆重建[J]. 矿物岩石地球化学通报, 38(1): 30~52.
- 王子正, 郭阳, 杨斌, 等. 2013. 扬子克拉通西缘 1.73 Ga 非造山型花岗斑岩的发现及其地质意义[J]. 地质学报, 87(9): 931~942.
- 吴孔文. 2008. 云南大红山层状铜矿床地球化学及成矿机制研究 [D]. 贵州: 中国科学院地球化学研究所.
- 吴懋德, 段锦芬, 宋学良. 1990. 云南昆阳群地质 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 1~200.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1589~1604.
- 徐启东. 1998. 滇中大红山岩群变质火山岩类的原岩性质和构造属性[J]. 地球化学, 27(5): 422~431.
- 颜丹平, 周美夫, 宋鸿林, 等. 2002. 华南在 Rodinia 古陆中位置的讨论——扬子地块西缘变质-岩杂岩证据及其与 Seychelles 地块的对比[J]. 地学前缘, 9(4): 249~256.
- 杨红, 刘福来, 杜利林, 等. 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[J]. 岩石学报, 28(9): 2994~3014.
- 杨红, 刘福来, 刘平华, 等. 2013. 扬子地块西南缘大红山群石榴白云母-长石英片岩的白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 29(6): 2161~2170.
- 杨朝. 2023. 扬子西南撮科杂岩和大红山群的岩浆-变质历史及其对元古代超大陆演化的启示[D]. 中国地质大学(武汉).
- 杨红, 刘平华, 孟恩, 等. 2014. 扬子地块西南缘大红山群变质基性岩的地球化学研究及构造意义[J]. 岩石学报, 30(10): 3021~3033.
- 尹福光, 孙志明, 任光明, 等. 2012. 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, 86(12): 1917~1932.
- 张鸿翔, 刘从强, 徐志方, 等. 2001. 扬子板块西缘早元古代俯冲体系的地球化学证据——有关变基性岩的微量元素地球化学研究[J]. 矿物学报, 21(2): 231~238.
- 张学诚. 1995. 康滇裂谷带火山活动及其碱性(钠质)火山岩系特征[J]. 云南地质, 14(2): 81~98.
- 郑永飞, 张少兵. 2007. 华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化[J]. 科学通报, 52(1): 1~10.