



粤东北长田地区南雄群沉积岩锆石年代学及其地质意义

唐聪¹, 潘家永^{1,2}, 闵壮¹, 黄广文¹

1. 东华理工大学, 江西南昌 330013; 2. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西南昌 330013

摘要: 粤东北长田盆地是广东省重要的能源盆地之一。为详细了解该区地质结构、沉积物质特征、示踪砂岩物源等信息, 在野外地质调查基础上, 利用显微鉴定、电子探针分析(EPMA)和激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)等方法, 对长田盆地南雄群典型砂岩开展系统研究。结果表明: 研究区白垩系上统南雄群上亚群主要为(含炭质)岩屑石英砂岩, 其次为钙质砂岩、(泥质)粉砂岩、细砂岩、砾岩及杂砂岩, 普遍发育明显的次生变化和金属矿化现象。南雄群碎屑锆石研究显示, 样品中大部分碎屑锆石具有较好的振荡环带且 Th/U 值常大于 0.4, 指示锆石主要为岩浆结晶成因, 有少量复杂成因变质锆石。U-Pb 谐和年龄可大致分为 2506~1666 Ma、1815~941 Ma、510~434 Ma、308~234 Ma、172~99 Ma 五组, 可与粤东北已知大地构造运动事件相对应, 表明研究区的构造-岩浆活动主要受中国东部岩浆构造活动控制, 并具有阶段性幕式发展演化的特点。通过对南雄群碎屑岩岩相学、锆石 U-Pb 年龄、稀土元素特征的系统分析, 并与可能物源区进行对比研究, 认为南雄群碎屑物质主要来自长田盆地西缘的中生代岩浆岩侵入体。

关键词: 南雄群; 白垩系; 碎屑锆石; 沉积物质来源; 地质年代学; 广东省

ZIRCON GEOCHRONOLOGY FOR SEDIMENTARY ROCKS OF NANXIONG GROUP IN CHANGTIAN AREA, NORTHEAST GUANGDONG: Geological Implication

TANG Cong¹, PAN Jia-yong^{1,2}, MIN Zhuang¹, HUANG Guang-wen¹

1. East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract: Changtian Basin is one of significant energy basins in Guangdong Province. To learn the geological structure, sedimentary material characteristics and tracer sandstone provenance in detail, microscopic identification, electron probe microanalysis (EPMA) and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometer (LA-ICP-MS) are used to systematically study the typical sandstones of Nanxiong Group in Changtian Basin on the basis of field geological survey. The results show that the Upper Cretaceous Nanxiong Upper Subgroup is mainly composed of (carbonaceous) lithic quartz sandstone, followed by calcareous sandstone, (argillaceous) siltstone, fine sandstone, conglomerate and greywacke, generally developed with obvious secondary changes and metallization. The analysis of detrital zircons from Nanxiong Group reveals that most of the zircons in the samples have perfect oscillatory bands with Th/U values usually greater than 0.4, indicating the zircons are mainly of magmatic crystallization origin, with a few metamorphic zircons of

收稿日期: 2021-10-19; 修回日期: 2021-12-04. 编辑: 张哲.

基金项目: 核资源与环境国家重点实验室开放基金项目“华南热液铀矿床‘红化’蚀变机理及其实质研究”(2020NRE03)和“桂北摩天岭达亮铀矿床关键蚀变矿物特征及其对成矿环境的制约”(2020NRE04).

作者简介: 唐聪(1995—), 男, 硕士研究生, 地质资源与地质工程专业, 通信地址 江西省南昌市青山湖区广兰大道 418 号, E-mail//1056958968@qq.com

通信作者: 潘家永(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床地球化学研究工作, 通信地址 江西省南昌市青山湖区广兰大道 418 号, E-mail//jypan@ecit.cn

complex origin. The U-Pb concordant ages can be roughly divided into five groups: 2506–1666 Ma, 1815–941 Ma, 510–434 Ma, 308–234 Ma, and 172–99 Ma, which correspond to the known tectonic events in northeast Guangdong, reflecting that the tectono-magmatic activities in the study area are mainly controlled by the magmatic activities in eastern China, with the characteristics of episodic development and evolution. Based on the systematic analysis of lithography, zircon U-Pb age and REE characteristics of clastic rocks from Nanxiong Group, and comparison with the possible provenance, it is concluded that the detrital materials were mainly derived from Mesozoic magmatic intrusions in the western margin of Changtian Basin.

Key words: Nanxiong Group; Cretaceous; LA-ICP-MS; detrital zircon; source of sedimentary material; geochronology; Guangdong Province

0 前言

长田向斜盆地位于东西向南岭多金属成矿带东端与北东向武夷多金属成矿带南西端的交汇部位,河源深断裂与莲花山断裂带之间,是形成于中—新生代的陆相火山断陷盆地。区内褶皱构造发育,断裂构造常见,火山活动强烈,成矿地质条件良好^[1-3]。野外地质调查和钻孔工程资料显示,盆地基底主要由寒武系、泥盆系—石炭系浅变质岩和文象花岗岩组成,盖层主要由下白垩统官草湖群和南雄群碎屑岩组成,二者呈不整合接触关系,整体构成一个上叠式断陷盆地和“火盆套红盆”的格局。

前人针对长田盆地周缘出露岩体开展过诸多研究,并取得较为丰硕的研究成果,如早白垩世大神坝岩体(135 Ma)和印支期—燕山期桂坑花岗岩体、八尺片麻状花岗岩(165±1 Ma)^[4]、水车镇一带加里东期及燕山期二长花岗岩(439.9±4.6 Ma、152.9±1.3 Ma)^①、明山嶂一带火山岩及花岗岩(143±1.5 Ma、139±2.5 Ma和143.8±1.5 Ma)^②。研究结果显示,不同时期的侵入体对长田盆地的断陷形成、物质来源、热液活动存在显著影响。前人认为盆地基底文象花岗岩形成于早侏罗世晚期,附近的察甘矿床成矿分为3个阶段并形成于晚白垩世之后^[4];针对柏埔地区燕山期小岩体开展了主量、微量、稀土元素系统研究^[5],并注重铀成矿地质条件特征总结^[6];区域成矿潜力研究^[7-8]和区域放射场研究^[9]显示,该区及附近区域研究程度相对薄弱;针对盆地西侧的罗浮岩体等,开展了铀成矿地质特征与成矿预测工作^[10-11]。

本文利用显微岩相学、电子探针分析和激光原位

分析等方法,对长田盆地碎屑岩开展矿物学、岩石学、锆石年代学及原位微量元素研究,将测试结果与区域岩体对比分析碎屑物源,进一步探讨岩石类型、沉积构造背景和沉积物质来源,为区域地层研究及找矿勘查部署提供参考。

1 区域地质背景

研究区大地构造位置处于华夏板块中部,永安—梅县褶断带的长田复向斜盆地,梅县—蕉岭山字型构造西翼反射弧弧顶^[12]。区域构造以北东向、北西向断裂为主,褶皱构造相对发育,出露的中酸性侵入岩有晚奥陶世二长花岗岩、晚侏罗世—早白垩世二长花岗岩及新发现的三叠纪白云母花岗岩。地层发育相对完整,除缺失奥陶系、志留系外,从震旦系—第四系均有出露,其中以白垩系的火山岩和沉积岩层分布最广。研究区内出露以侏罗系、白垩系为主。地表局部出露晚白垩世花岗岩,以微细粒二长花岗岩为主,偶见辉绿玢岩脉(图1)。

1.1 地层

(1) 白垩系下统官草湖群(K_1gn)

官草湖群下亚群(K_1gn^1):分布于长田向斜的两翼,出露面积较大,以东部出露面积最大。主要出露灰白色、紫红色细粒岩屑石英砂岩、杂砂岩、粉砂岩,是以火山碎屑物为主的红色火山湖泊相的碎屑岩建造。厚度大于185 m,与下伏高基坪群(J_3gj)不整合接触。

官草湖群上亚群(K_1gn^2):主要分布于盆地中部,长田向斜核部两侧。主要出露灰白色变质岩屑长石砂岩、长石石英砂岩。岩层倾向南西或北东,倾角28~

① 广东省佛山地质局. 广东1:5万畚坑圩幅、水车圩幅、五华县幅、丰良镇幅区域地质调查报告. 2010.

② 广东省地质调查院. 广东1:5万明山嶂煤矿幅、高坡圩幅、砂田圩幅、潭江圩幅区域地质矿产调查报告. 2016.

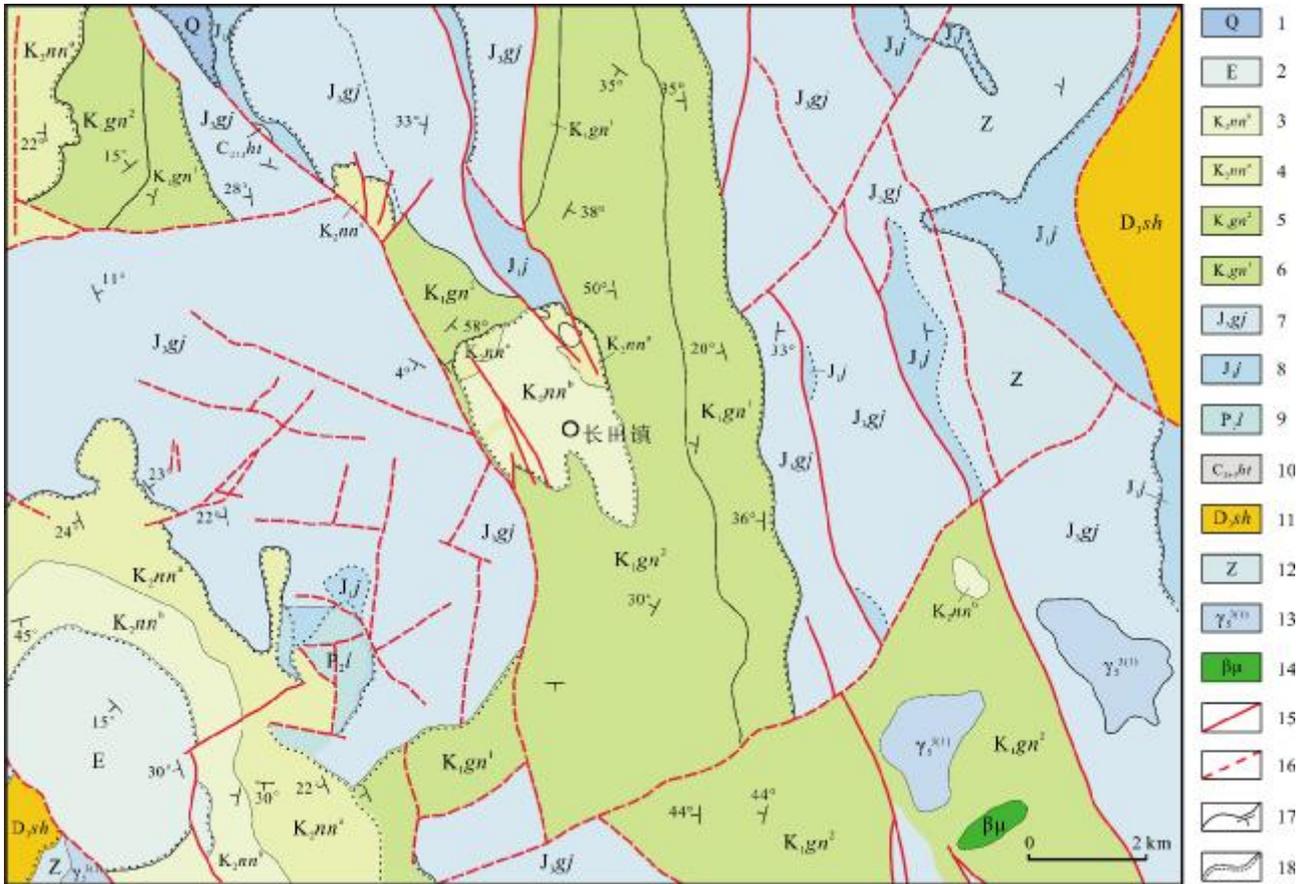


图1 粤东北长田地区构造地质简图

Fig. 1 Structural geological sketch map of Changtian area in northeast Guangdong

1—第四系 (Quaternary); 2—古近系 (Paleogene); 3—南雄群上部 (Upper Nanxiong gr.); 4—南雄群下部 (Lower Nanxiong gr.); 5—官草湖群下部 (Lower Guancaohu gr.); 6—官草湖群上部 (Upper Guancaohu gr.); 7—高基坪群 (Gaojiping gr.); 8—金鸡组 (Jinji fm.); 9—龙潭组 (Longtan fm.); 10—壶天群 (Hutian gr.); 11—双头群 (Shuangtou gr.); 12—震旦系 (Sinian); 13—花岗岩 (granite); 14—辉绿玢岩 (sillite); 15—实测断层 (surveyed fault); 16—推测断层 (inferred fault); 17—地质界线及产状 (geological boundary and occurrence); 18—不整合接触 (unconformity)

80°,靠近盆地中部产状变缓.

(2)白垩系上统南雄群(K_{2nn})

南雄群下亚群(K_{2nn^a}):分布于研究区中西部,主要岩性为钙质含砂砾岩、中细粒钙质岩屑砂岩、砂质砾岩、砂砾岩.地层倾向南西或北东,倾角5~15°,为一套砂砾岩与砂质泥岩、泥质砂岩的沉积.总厚达2 900 m,与下伏官草湖群呈不整合接触,含轮藻、恐龙蛋化石等.

南雄群上亚群(K_{2nn^b}):主要分布在长田向斜轴部西部,主要岩性为土黄色中细粒岩屑石英杂砂岩、(含炭质)细粒长石石英砂岩、含砾钙质岩屑(石英)杂砂岩、细粒钙质砂岩、钙质细砂岩、钙质泥质粉砂岩、砂质砾岩,以细粒砂状结构为主.

1.2 构造

粤东北区域构造具有多期多阶段活动的特点.奥

陶纪—志留纪、三叠纪以区域性挤压为主,形成大量褶皱构造.中侏罗世开始由拉张环境向挤压环境转变,粤东北拗陷变成受莲花山断裂带控制的挤压构造带,同时在山间盆地中沉积大量砂岩、砾岩和火山岩.晚侏罗世,东南太平洋板块俯冲作用诱发强烈岩浆活动,伴随有中酸性岩浆活动.白垩纪则以断裂运动为主,并伴随较强的火山活动及岩浆侵入.古近纪以来以断块作用为主.

褶皱构造主要表现为长田向斜(图1).盆地南西侧地层倾向为北东、北北东,倾角28~80°;南侧地层倾向北、北东,倾角14~20°;北东侧地层倾向为南西,倾角35~60°.靠近两翼产状较陡,靠近向斜核部产状逐渐变缓.向斜核部产状较为杂乱,地层主要近于水平,一般5~13°^[13].

研究区断裂构造极为发育,主要分布于盆地西部,多为层间破碎带.其次为高角度正断层,多呈雁行式或阶梯式展布,以北西向为主,北东向次之.断裂带内见强硅化、角砾化现象.长田断裂为区内控盆和控矿断裂.

1.3 岩浆岩

区内岩浆岩在空间上主要沿粤东构造活动带和永梅拗陷带分布.

三叠纪侵入岩在研究区活动较弱,出露于永梅拗陷带的玉水铜矿南部,仅见和尚顶出露中粒黑云石英二长花岗岩,呈岩株产出,侵入中晚泥盆世变质石英砂岩之中.岩石呈淡灰色,由条纹长石、更长石、石英和黑云母组成,见磁铁矿、磷灰石等副矿物.

粤东北地区可见5期侏罗纪—白垩纪侵入岩:第一期以辉长岩、闪长岩、石英闪长岩等小岩株为主,包括霞岗、永和北三枫、芦屋等;第二期以花岗闪长岩和二长花岗岩为主,如龙窝、大埔圩及玉水等地;第三期

黑云母花岗岩分布广泛,是本区活动最强的岩浆活动,可见岩体侵入上侏罗统,并被白垩系砂砾岩覆盖;第四期包括闪长岩、石英闪长岩、石英二长岩、花岗闪长(斑)岩、花岗岩;第五期见花岗斑岩、石英斑岩等小岩株,侵位于白垩系红色砂岩及第三期岩体中.

古近纪—新近纪岩浆活动较弱,主要为辉长岩、辉绿岩、辉绿玢岩等小岩株,如杨家庄岩体.

2 样品采集与分析测试

采集工业钻孔中南雄群上亚群红色砂岩共计30个样品,开展岩矿鉴定、电子探针分析(图2)、锆石U-Pb年龄和原位稀土元素测试工作.样品预处理由南昌华地科技有限公司完成,电子探针分析在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室利用JXA-8230完成,锆石U-Pb定年和原位稀土元素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司利用LA-ICP-MS完成.详细仪器参数和测试方法见文献[14-15].

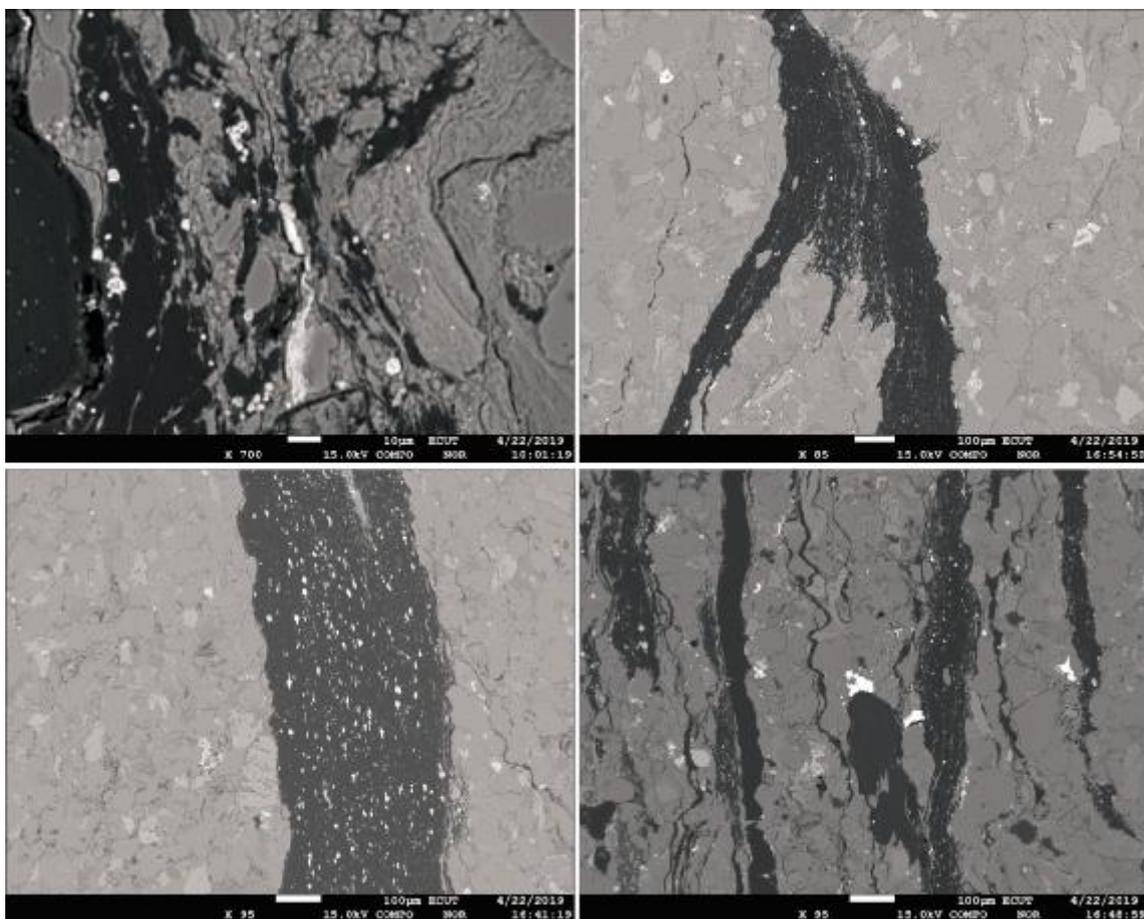


图2 南雄群砂岩电子背散射图像

Fig. 2 BSE images of sandstone samples from Nanxiong Group

3 碎屑锆石分析

3.1 U-Pb 同位素年代学

阴极发光电子图像(CL)显示锆石颗粒(图3)晶形复杂多样,以长短柱状、椭球状、浑圆状为主,其次呈多边形、不规则状,粒径30~200 μm,且部分锆石发生碎裂现象.大部分锆石具有良好的振荡环带,少量锆石具有古老的中心核,表明其以岩浆结晶成因为主,其中较细的环带宽度可指示中酸性的岩浆沉淀环境.样品中锆石Th、U和Th/U值变化区间较大(表1,扫描首页OSID二维码可见),锆石中Th含量 33.9×10^{-6} ~ 373.9×10^{-6} ,U含量 68.0×10^{-6} ~ 999.0×10^{-6} .大部分锆石Th/U值大于0.4,普遍小于1,表明锆石类型主要为岩浆锆石.另外存在少量锆石(2~3颗)具有较低的Th含量和较高的U含量,以及极低的Th/U值(小于0.1),结合其CL图像及微量元素特点,认为以变质成因为主^[16].变质锆石有变质新生和变质改造等类型,以复杂的外部形态和内部结构可与岩浆锆石相区分^[17-18].锆石的磨圆度间接指示沉积物经过快速剥蚀和近距离的搬运沉积,与岩相学的低成分成熟度和复杂岩屑组成相吻合.

ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测定,去除个别谐和度小于90%的测点数据(仅1个),并且在数据处理和综合解译时,对年龄大于1 000 Ma测点利用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb

投图,年龄小于或等于1 000 Ma测点利用²⁰⁶Pb/²³⁸U投图,这样可使数据解译更科学、准确、可靠^[19].本研究利用37个锆石U-Pb年龄综合分析得出,年龄有相对集中分布之趋势,可以大致划为5组,其中两组的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄介于2 506~941 Ma(图4b),年龄明显较老,数据谐和度相对较好,文中没有将其作为图解列出,其中有少量处于一致线以下,可能是锆石发生不同程度的Pb丢失现象.其他3组²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄相对年轻(510~99 Ma),这些年轻锆石的谐和度相对偏高,总体靠近一致线上或两侧(图4a).

3.2 稀土元素特征

南雄群沉积岩碎屑锆石LA-ICP-MS原位微区测定稀土元素分析结果如表2(扫描首页OSID二维码可见).其中碎屑锆石ΣREE介于 85.96×10^{-6} ~ 1354.01×10^{-6} ,LREE和HREE分别介于 2.42×10^{-6} ~ 375.27×10^{-6} 和 78.64×10^{-6} ~ 1346.63×10^{-6} ,可见其稀土元素的各项含量均变化明显.利用前人提供的球粒陨石标准值对表中测试结果进行标准化^[20], $(La/Yb)_N$ 值介于0~0.232,LREE/HREE值介于0.003~0.741,均显示南雄群碎屑锆石轻、重稀土元素分异明显,且重稀土含量相对富集.

不同成因类型的锆石,其稀土元素配分模式存在较大差别^[21].图5显示南雄群上部锆石主要具有岩浆



图3 南雄群砂岩碎屑锆石 CL 图像

Fig. 3 CL images of detrital zircons in sandstone samples from Nanxiong Group

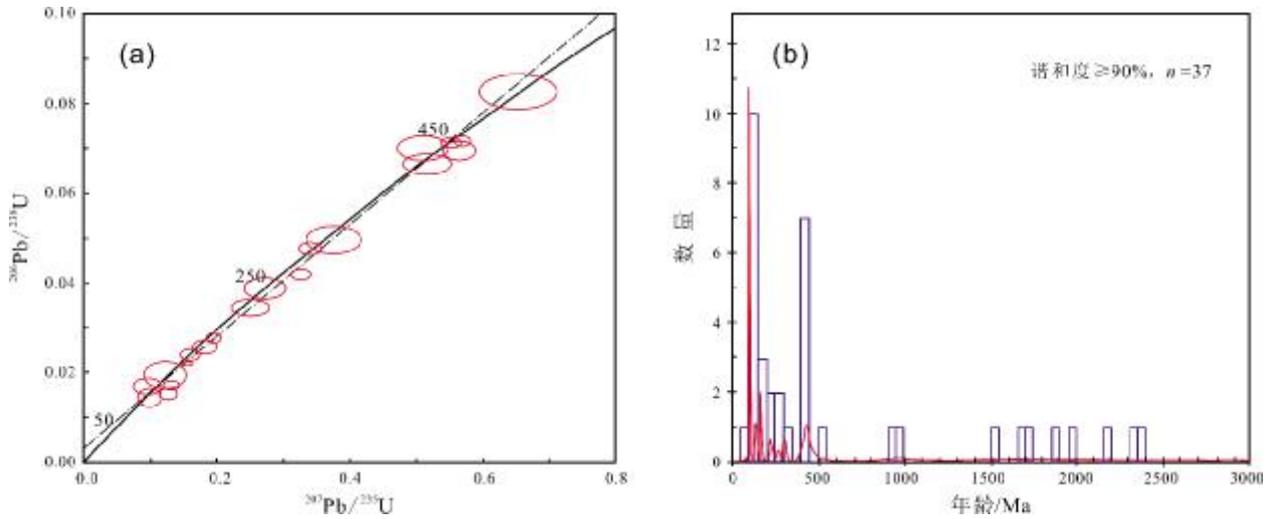


图 4 南雄群碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图及频谱图

Fig. 4 U-Pb age concordia diagram and spectogram of detrital zircons from Nanxiong Group

锆石的典型结构特征,显示富集 HREE,亏损 LREE,从 La 到 Lu 元素的球粒陨石均一化值具逐渐上升的特点. δEu 值为 0.016~0.592, δCe 值为 1.087~293.82, 具明显的“谷”状 Eu 异常、“峰”状 Ce 异常^[20], 说明其具有壳源岩浆锆石的稀土元素证据, 同时也有少量复杂变质锆石存在. 再次证明, 南雄群砂岩锆石以为燕山期岩浆锆石为主, 同时存在少量的复杂成因变质锆石^[21]. 将稀土元素测试结果与区域岩浆岩配分曲线进行对比, 结合区域地层、构造和岩浆岩特点, 认为盆地碎屑物来源相对复杂, 但以周缘燕山期岩浆岩风化产物为主.

4 讨论

样品中最年轻的碎屑锆石 U-Pb 年龄为 99 Ma, 说明南雄群砂岩形成年龄主体晚于 99 Ma, 与其形成于晚白垩世的地质事实相符. 通过对样品中 37 组谐和度较高(大于 90%)的 U-Pb 年龄进行统计分析, 年龄大致可划为 5 组, 分别为 2506~1666 Ma, 1815~941 Ma, 510~434 Ma, 308~234 Ma, 172~99 Ma. 通过对比碎屑锆石的形态、磨圆、晶体结构及稀土元素特点, 可得出锆石以岩浆结晶成因为主, 所以上述每一年龄分组的锆石均可能代表一次强烈的岩浆-构造事件. 这些年龄区间的峰期年龄可分别对应吕梁期、晋宁期、加里东期、印支期和燕山期等构造运动期次, 表明研究区的构造-岩浆活动主要受中国东部岩浆构造活动所控制, 并具有阶段性幕式发展演化的特点.

研究区位于广东省东北部, 区域岩浆-构造活动一直较为活跃. 岩相学显示其含有大量岩浆岩屑和炭屑, 具低的成分成熟度和结构成熟度, 总体具有燕山期侵入岩的特点. 通过统计 5 组 U-Pb 年龄的碎屑锆石数量, 发现 173~99 Ma 数量相对较多(占总量约 34%), 按照构造旋回特点和岩浆侵入时代, 符合燕山期(尤其晚期)的岩浆构造活动产物. 前人将燕山期岩浆活动大致分为 5 个期次, 各期次锆石在南雄群含矿砂岩中均有分布, 其中以主要侵位为白垩系红色砂岩内^[22]的燕山晚期(燕山第五期)最为常见^[23]. 将稀土元素配分曲线与区域上岩体进行对比, 主要与燕山期岩浆岩配分模式类似^[24]. 前人的区域地质调查结果显示,

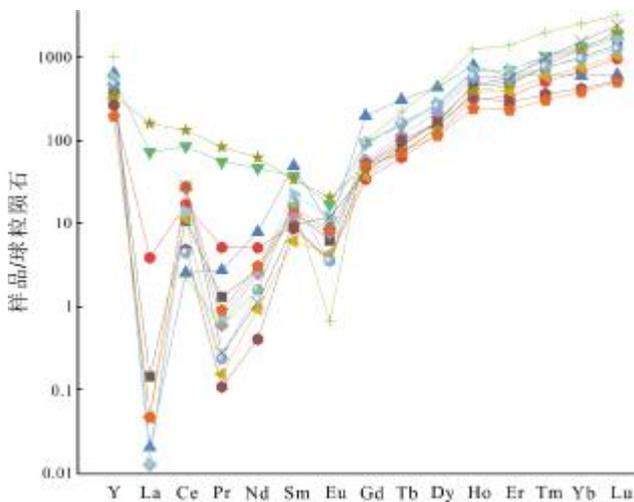


图 5 南雄群碎屑锆石稀土元素球粒陨石标准化配分模式图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of detrital zircons from Nanxiong Group

南雄群覆盖于中生代花岗岩之上,区域上出露也以中生代花岗岩为主,这与碎屑锆石的频数分布特征相吻合,其中部分古老年龄的碎屑锆石可能并不直接来自岩体剥蚀,而是中生代岩体中捕获的古老锆石晶体。

长田盆地的研究程度和工作基础相对薄弱,本文通过野外观察及采样、区域地质资料整理、相关分析测试实验和数据综合处理解释,认为该区缺失三叠系地层是梅州地区印支期构造事件的响应,附近的叶华岩体则是印支期构造-岩浆活动的记录。在晚三叠世一早侏罗世主要处于拉张构造环境并形成断陷盆地,形成一套金鸡组(J_j)含生物碎屑和有机碳的海相沉积细碎屑岩。在晚侏罗世一早白至世,粤东北地区受岩石圈伸展拉张的构造背景的影响,出现广泛分布的中酸性岩体,北东向区域性深大断裂控制了岩浆活动的总体展布。综合说明南雄群沉积岩物质来源主要是周边出露的燕山期花岗岩体,其次为印支期和加里东期侵入岩体,燕山期岩体以盆地西侧的罗浮岩体和大坪岩体为主。

5 结论

(1)U-Pb 同位素定年分析表明最年轻的锆石年龄为 99 Ma,显示南雄群沉积岩成岩年龄晚于 99 Ma。

(2)不同年龄段的碎屑锆石均具有轻稀土元素含量低、重稀土元素含量高的左倾模式且具有适度的负 Eu 异常、正 Ce 异常,指示南雄群沉积岩主要物质来源于岩浆岩。

(3)碎屑锆石年龄谱可与中国东部(粤东北)岩浆构造活动对应,并有幕式发展演化的特点。沉积岩碎屑物质来源主要是周边出露的燕山期花岗岩体,以盆地西侧的罗浮岩体和大坪岩体为主。

参考文献(References):

[1]余端珍.粤东北仁差盆地北部某矿床地质特征及矿床成因分析[J].四川建材,2012,38(6):243-245.
Yu D Z. The geological characteristics and genetic analyses of a deposit in northern Renchai Basin, northeast Guangdong Province[J]. Sichuan Building Materials, 2012, 38(6): 243-245. (in Chinese)

[2]鲁晶.粤东北河源地区构造演化与成矿关系讨论[J].世界有色金属,2018(8):152-154.
Lu J. Tectonic evolution and mineralization of Heyuan area, Guangdong Province[J]. World Nonferrous Metals, 2018(8): 152-154.

[3]吴承健,吴延之.闽西南-粤东北地区大地构造演化与铜、(伴生)银的成矿作用[J].大地构造与成矿学,1994,1(4):345-352.
Wu C J, Wu Y Z. Geotectonic evolution and Cu-(associated) Ag metallogenesis in Southwest Fujian and Northeast Guangdong [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1994, 1(4): 345-352.

[4]徐先兵,张岳桥,贾东,等.锆石 LA-ICP-MS U-Pb 与白云母 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学及其对中国东南部早燕山事件的制约[J].地质科技情报,2010,29(2):87-94.
Xu X B, Zhang Y Q, Jia D, et al. Geochronology of zircon La-ICP-MS U-Pb and muscovite ⁴⁰Ar/³⁹Ar: Constrains to Early Yanshanian event in Southeast China[J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(2): 87-94.

[5]张善果,阮昆.粤东北柏埔地区燕山期小岩体地球化学特征与铀成矿探讨[J].世界核地质科学,2019,36(2):73-81.
Zhang S G, Ruan K. Geochemical characteristics and uranium mineralization of Yanshanian small pluton in Bopu area of northeastern Guangdong[J]. World Nuclear Geoscience, 2019, 36(2): 73-81.

[6]唐湘生,聂斌,李嘉.武夷山成矿带铀成矿特征与找矿方向[J].铀矿地质,2011,27(2):69-73.
Tang X S, Nie B, Li J. Uranium metallogenic characteristics and exploration direction of Wuyishan metallogenic belt [J]. Uranium Geology, 2011, 27(2): 69-73.

[7]杨华,杨仁广.河源盆地××铀矿床成矿条件分析[J].四川建材,2011,37(4):95-96.
Yang H, Yang R G. Analysis of metallogenic conditions of XX uranium deposit in Heyuan Basin[J]. Sichuan Building Materials, 2011, 37(4): 95-96. (in Chinese)

[8]陈祝海,郑明良,宋仕珠,等.广东河源成矿带铀资源现状及成矿潜力分析[J].铀矿地质,2008,24(2):108-111.
Chen Z H, Zheng M L, Song S Z, et al. Analysis on uranium resources situations and metallogenic potential of Heyuan mineralization belt of Guangdong Province[J]. Uranium Geology, 2008, 24(2): 108-111.

[9]林卜云.广东河源地区放射场特征初探[J].铀矿地质,1996,12(1):37-40.
Lin B Y. Preliminary discussion on the characteristics of radioactive fields in the Heyuan Area of Guangdong Province[J]. Uranium Geology, 1996, 12(1): 37-40.

[10]吴建勇,阮昆,龙自强,等.粤东罗浮岩体北部铀成矿条件分析[J].铀矿地质,2020,36(3):167-173.
Wu J Y, Ruan K, Long Z Q, et al. Analysis on metallogenic conditions of northern Luofu pluton in the east of Guangdong [J]. Uranium Geology, 2020, 36(3): 167-173.

[11]汤谨晖.粤东北仁差盆地铀多金属成矿地质特征与成矿预测[D].南昌:东华理工大学,2020.
Tang J H. Metallogenic geological characteristics and metallogenic prediction of uranium and polymetallic ore in Renchai Basin of Northeast Guangdong [D]. Nanchang: East China University of

- Technology, 2020.
- [12]宋仕珠, 赵巍, 郑明良, 等. 粤东北仁差盆地麻楼逆冲推覆构造特征与铀成矿作用[J]. 铀矿地质, 2010, 26(5): 283-287, 312.
Song S Z, Zhao W, Zheng M L, et al. Features and uranium mineralization of Malou thrust nappe structure in Renchai Basin of Northeast Guangdong [J]. Uranium Geology, 2010, 26(5): 283-287, 312.
- [13]娄峰, 于玉帅, 郑义, 等. 粤东北仁差盆地构造演化与铀成矿构造机制探讨[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2017, 56(4): 145-153.
Lou F, Yu Y S, Zheng Y, et al. Tectonic evolution and mechanism of uranium mineralization structure in the Renchai Basin, northeastern Guangdong [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2017, 56(4): 145-153.
- [14]黄卉, 潘家永, 洪斌跃, 等. 陕西华阳川-多金属矿床晶质铀矿电子探针 U-Th-Pb 化学定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 2020, 39(2): 351-368.
Huang H, Pan J Y, Hong B Y, et al. EPMA chemical U-Th-Pb dating of uraninite in Huayangchuan U-polymetallic deposit of Shaanxi Province and its geological significance [J]. Mineral Deposits, 2020, 39(2): 351-368.
- [15]叶丽娜, 孙丰月, 王力, 等. 吉东大栗子铁矿区石英二长斑岩 U-Pb 年龄、地球化学及 Hf 同位素组成[J]. 地球科学, 2020, 45(5): 1544-1555.
Ye L N, Sun F Y, Wang L, et al. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Hf isotopic composition of the quartz monzonite porphyry intrusion from east Jilin Province [J]. Earth Science, 2020, 45(5): 1544-1555.
- [16]兰中伍, 陈岳龙, 苏本勋, 等. 四川松潘-甘孜盆地砂岩的物质来源: 来自锆石 U-Pb (SHRIMP) 年龄证据[J]. 沉积学报, 2006, 24(3): 321-332.
Lan Z W, Chen Y L, Su B X, et al. The origin of sandstones from the Songpan-Ganze Basin, Sichuan, China: Evidence from SHRIMP U-Pb dating of clastic zircons [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(3): 321-332.
- [17]Gehrels G E, Johnsson M J, Howell D G. Detrital zircon geochronology of the Adams argillite and Nation River Formation, East-Central Alaska, U.S.A. [J]. Journal of Sedimentary Research, 1999, 69(1): 135-144.
- [18]雷开宇. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区直罗组碎屑锆石稀土元素特征及地质意义[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2015, 34(4): 58-62.
Lei K Y. Rare earth elements of detrital zircon characteristics and geological significance of zhiluo formation in Hangjinqi Area, Ordos Basin [J]. Journal of Yanan University (Natural Science Edition), 2015, 34(4): 58-62.
- [19]Ludwig K R. User's manual for Isoplot/Ex. Version 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 4(2): 1-70.
- [20]Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 143(5): 602-622.
- [21]雷玮琰, 施光海, 刘迎新. 不同成因锆石的微量元素特征研究进展 [J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 173-284.
Lei W Y, Shi G H, Liu Y X. Research progress on trace element characteristics of zircons of different origins [J]. Earth Science Frontier, 2013, 20(4): 173-284.
- [22]Mao J R, Li Z L, Ye H M. Mesozoic tectono-magmatic activities in south China: Retrospect and prospect [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 57(12): 2853-2877.
- [23]肖振宇. 粤东北嵩溪银锑矿床地质地球化学及成矿模式 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2001.
Xiao Z Y. Geology, Geochemistry and metallogenic model of Songxi silver-antimony deposit in northeast Guangdong [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2001. (in Chinese)
- [24]夏菲, 陈军胜, 王晓娜, 等. 广东平远县 278 铀矿床流纹岩、次流纹斑岩和辉绿岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义 [J]. 地质与勘探, 2017, 53(1): 109-123.
Xia F, Chen J S, Wang X N, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating on rhyolites, supergene rhyolite porphyry and diabase of No. 278 uranium deposit in Pingyuan County, Guangdong and its geological implications [J]. Geology and Exploration, 2017, 53(1): 109-123.