中国科学: 地球科学 2010 年 第 40 卷 第 10 期: 1377 ~ 1388
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

华南东段前泥盆纪构造演化: 来自碎屑锆石的证据

向磊, 舒良树*

内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093
* 联系人, E-mail: lsshu2003@yahoo.com.cn

收稿日期: 2009-10-04; 接受日期: 2010-07-06
国家自然科学基金(批准号: 40634022, 40972132)和内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室项目(编号: 2008-I-01)资助

摘要 利用 LA-ICP-MS 分析技术, 对华南东段赣南地区泥盆纪和奥陶纪粗碎屑岩中的 5 件样品进行了碎屑锆石的 U-Pb 年代学研究, 获得该区前泥盆纪地壳演化的丰富信息. 312 组谐和年龄数据主要集中在 2600~2300 Ma(峰值 2470 Ma)、1100~900 Ma(峰值 980 Ma)、900~700 Ma(峰值 800 Ma)、650~520 Ma(峰值 580 Ma)和 450~400 Ma(峰值 440 Ma)这五个时间段. 在一颗继承锆石的核部发现 3.5 Ga 的年龄值. 分析认为, 1100~900 Ma 为全球 Rodinia 大陆聚合、Grenville 造山带形成的特征年龄值, 出露在华夏南东缘的 972 Ma 流纹岩层以及同期基性变质岩可与该年龄值匹配, 可能揭示华夏陆块曾是 Rodinia 大陆的一部分; 900~700 Ma 对应着 Rodinia 大陆的裂解过程, 这期事件的地质标志如花岗岩、基性岩墙、裂谷型沉积作用等, 在研究区多处出现; 650~520 Ma 对应泛非事件, 目前地表尚无相应的岩浆岩石和构造形迹的记录; 450~400 Ma 是全球早古生代晚期造山作用的特征年龄, 研究区大量分布的志留纪-早泥盆世 S 型花岗岩体以及对应的岩浆锆石测年值, 是华夏陆块在早古生代晚期发生强烈造山作用的物质与年龄证据. 本文还对 2470 Ma 峰值年龄和华夏陆块来源及其连接进行了探讨.

关键词
碎屑锆石
U-Pb 定年
构造演化
前泥盆纪
华南

华南东段赣南地区出露面积较广、地层较连续的早古生代岩层. 在构造单元区划上, 研究区隶属华夏陆块赣中-赣南残块的北部. 前人在此区做过较多工作: 20 世纪 50~60 年代, 南京大学花岗岩研究组认为该区是一个加里东期构造岩浆区[1,2]; 70~80 年代, 一些学者将该区早古生代环境划归为活动大陆边缘[3~6]; 90 年代以来, 随着先进同位素测年技术的发展和应用, 一些学者重新提出该区存在前震旦纪基底, 或华夏陆块的认识[7~19], 认为华南是一个发育在前震旦纪基底之上的早古生代褶皱带[20~22]. 最近对扬子东南缘江南区大量浅变质岩的碎屑锆石测年结果表明, 江南基底的时代似乎不老于 10 亿年[23], 那么, 华夏陆块基底的时代应为何时? 该基底是一期形成还是多期形成? 前泥盆纪构造演化如何? 华夏陆块源自何方? 迄今为止, 尚未有人在研究区对这些问题进行系统研究, 致使人们很难了解古老基底构造演化和源区的信息. 在邻区的南岭和武夷山, 虽有学者开展过部分研究, 并获得了华夏陆块前寒武纪基底演化的年代学信息[24~26], 但并未涉及早古生代地层区或褶皱带内部的成分构成和源区信息.

为了探讨华南东段前泥盆纪构造演化问题, 笔者在野外地质观察的基础上, 采用先进的U-Pb同位素测年技术, 对采自赣南下奥陶统爵山沟组(O_1j)和中泥盆统跳马涧组(D_2t)的 5 件粗碎屑岩样品进行了

引用格式: Xiang L, Shu L S. Pre-Devonian tectonic evolution of the eastern South China Block: Geochronological evidence from detrital zircons. Sci China Earth Sci, 2010, doi: 10.1007/s11430-010-4061-5

碎屑锆石的分离、CL影像分析和LA-ICP-MS U-Pb测年, 获得了 350 组年龄数据. 通过对特征年龄谱的统计分析和对比, 取得了有关华南前泥盆纪构造演化的若干新认识.

1 地质背景与地层序列

1.1 地质背景

研究区位于江绍断裂以南、政和-大埔断裂以北、赣江断裂以西的赣南泰和、井冈山、遂川、崇义一带(图 1). 该区及其邻区出露三套岩石-地层单元: ① 元古代变质基底单元, 主要分布在研究区东侧和北侧的武夷山和武功山地区, 研究区仅见零星露头; ② 震旦系(原上震旦统陡山沱组+灯影组)、寒武系、下-中奥陶统浅变质沉积单元; ③ 中泥盆世开始的稳定沉积单元.

前泥盆纪, 研究区及其邻区曾经发生过两期构造-岩浆事件, 时代分别为新元古代[7,9,12,13,27~29]和早古生代晚期(440~400 Ma)[19,30]. 第一期构造-岩浆事件早阶段形成了东乡-德兴-歙县蛇绿混杂岩带和岛弧火山岩[31~34], 晚阶段形成了大量S型花岗岩以及政和-大埔镁铁-超镁铁岩碎块带[35,36]. 第二期构造-岩浆事件则导致所有前泥盆纪岩层被强烈褶皱, 形成一个枢纽呈近东西向展布的复式背斜构造[37], 普遍发育低绿片岩相变质岩和糜棱岩[36,38], 产生大量S型花岗岩[18,39], 共同构成华南早古生代褶皱带.

在 400 Ma左右, 区域性的褶皱-缩短活动基本结束, 普遍发生快速剥蚀与堆积作用, 中泥盆统跳马涧组粗碎屑岩呈角度不整合覆盖在前志留纪变质岩[21]或前泥盆纪花岗岩[1]之上. 稍后, 该区进入一个相对稳定的晚古生代滨海-浅海相沉积环境阶段.

1.2 地层序列

1.2.1 变质基底单元

由上元古界下部的神山群和上部的南华系(原下震旦统)组成. 这是出露在赣中南地区的最老基底岩

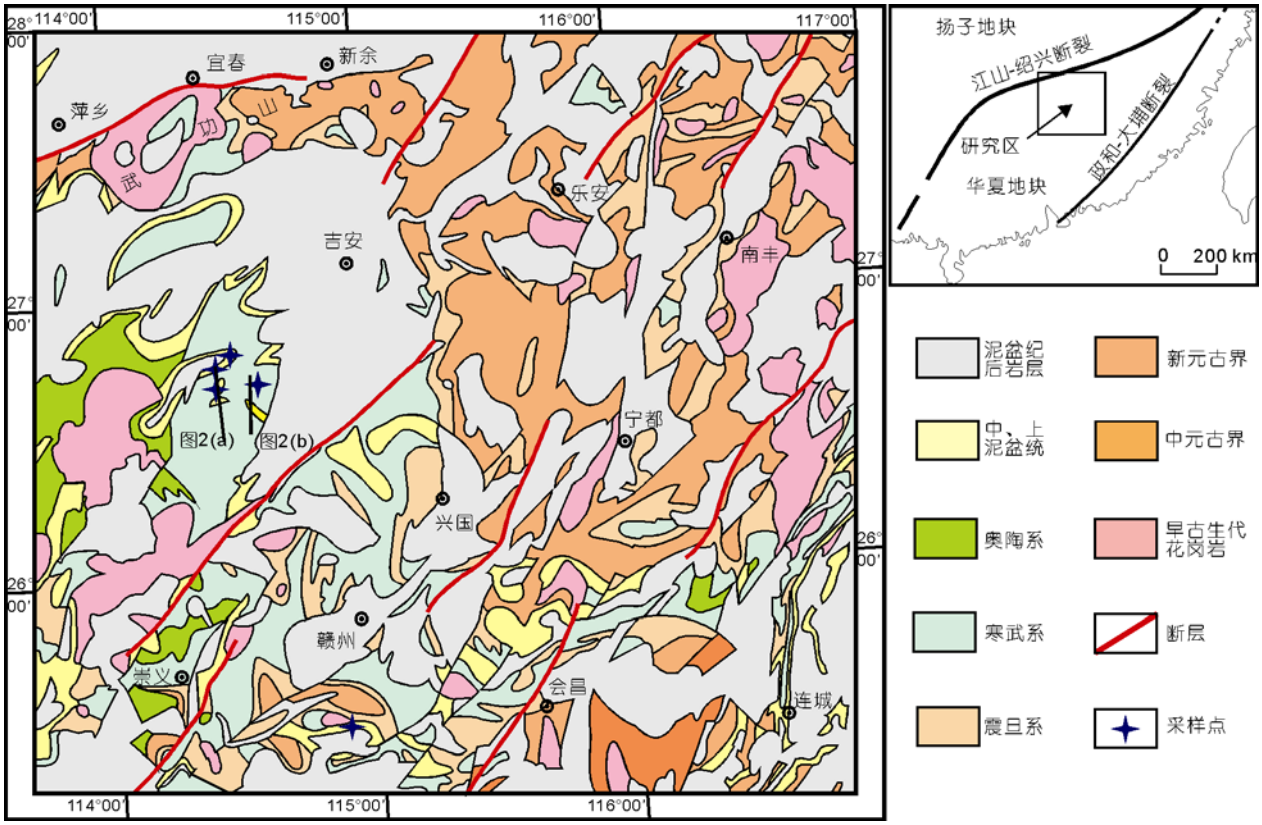


图 1 赣南及邻区前泥盆纪构造简图

据舒良树[18]修改

石单元. 其中, 神山群为一套绿泥-石英片岩、云母片岩、千枚岩、含碳千枚岩、板岩夹变质玄武岩、细碧岩、凝灰岩, 属于中级变质的碎屑岩-火山岩系, 厚约 3500 m.

南华系主要分布在赣中南的南城、新余、信丰、崇义、宜黄和会昌等地. 分上施组和下坊组两部分. 上施组厚 1600 m, 层位相当于三峡地区的莲沱组, 为砂质或粉砂质千枚岩夹含碳千枚岩、板岩, 局部夹大理岩和变余凝灰质砂岩; 底部见 2~3 m 厚含砾石长石砂岩; 韵律层、水平纹层、斜层理发育, 局部见波痕. 下坊组厚 330~1000 m, 层位相当于三峡地区的南沱组, 是著名的新余铁矿的赋矿层位; 由板岩化的含砾杂砂岩、含铁硅质岩、磁铁石英岩、石英砂岩、页岩、炭质千枚岩组成; 底部为砾岩-含砾泥岩组合.

1.2.2　浅变质的震旦纪-中奥陶世沉积单元

发育在上述变质基底单元之上, 是一套连续沉积的碎屑岩夹碳酸盐岩(多已变为大理岩)组合, 由泥砂质韵律岩层、长石砂岩、炭质岩和少量生物碎屑灰岩、硅质岩组成, 厚度约 5~7 km, 大面积出露在永新、莲花、井冈山、遂川、南康、崇义、大余、于都、瑞金和南城等地. 其中奥陶纪地层出露规模相对小些. 此套岩层中未见火山熔岩和火山碎屑岩, 反映一个稳定的陆棚-斜坡沉积环境. 各时段岩层特征分述如下.

该区震旦系称老虎塘组, 为一套韵律状泥砂质夹硅质岩组合, 偶夹灰岩和钙质砂岩岩层或透镜体; 未见化石; 岩层中微斜层理、斜层理、“泥包砂”或“砂包泥”等沉积构造常见; 变余砂岩具序粒层, 层面上见冲刷痕、印模. 在峡江县老虎塘建组剖面, 厚度为 423 m; 与下伏南华系呈区域假整合接触.

寒武系为一套韵律状泥砂质岩层夹灰岩、长石砂岩组合, 富产笔石, 偶产腕足类和腹足类, 具波痕、斜层理和印模构造. 根据沉积建造、岩石组合和化石组合特征, 寒武系自下而上可划分为牛角河组(~~$\in_1 n$~~)、高滩组(~~$\in_2 g$~~)和水石组(~~$\in_3 s$~~).

牛角河组由含碳绿泥绢云千枚岩、长石石英砂质板岩、变余沉凝灰岩、含碳板岩和炭质泥岩组成, 产海绵骨针; 底部普遍发育一套黑色页岩-炭质泥岩及黑色含碳含硅板岩; 岩层厚 1080~1310 m; 与下伏震旦系岩层呈整合接触关系[36]. 高滩组和水石组基本上都是由中细粒变余杂砂岩、长石砂岩、长石石英砂质板岩与含碳绢云千枚岩组成, 韵律层发育, 局部见变余含砾粗砂岩. 其中高滩组砂质组分较高, 粒度较粗, 具波痕和荷重模构造, 顶部夹灰岩; 厚 1747~2152 m; 而水石组砂质组分较少, 板岩较多, “泥包砂”构造常见. 厚 1526~2391 m.

奥陶系以韵律状泥砂质岩层(砂质层厚, 泥质层薄, 比例 3∶1~10∶1)为其主要特征, 富产笔石, 偶含三叶虫和腕足类. 由于志留纪地层缺失, 它常被中泥盆-上泥盆统粗碎屑岩层不整合覆盖. 自下而上可划分为爵山沟组($O_1 j$)、对耳石组($O_{1\text{-}2} d$)和石口组($O_{2\text{-}3} s$). 爵山沟组的中上部为绿泥绢云千枚岩与砂质板岩互层, 下部为含碳板岩和绿泥绢云千枚岩, 与下伏的寒武系为连续过渡关系. 对耳石组为含碳板岩、含碳绿泥绢云千枚岩夹硅质板岩. 石口组以变余长石石英砂岩和绢云母板岩为主, “泥包砂”或“砂包泥”等沉积构造发育. 在崇义县古亭乡, 奥陶系板岩中夹数层灰-深灰色块状-条带状泥晶灰岩和砂屑灰岩, 灰岩层最厚可达 60 m. 曾采获腕足类、珊瑚、腹足类等化石, 时代定为中奥陶-晚奥陶世[37]. 因多年连续采掘或填埋, 目前露头小而少.

值得一提的是, 我们的野外调查结果表明, 除下寒武统之外, 黑色页岩-炭质泥岩还分布在寒武系中上部和下奥陶-中奥陶统多个层段, 且厚薄不一. 受早古生代晚期构造-岩浆事件影响, 震旦系-中奥陶统普遍发生强烈褶皱变形和低绿片岩相区域变质作用, 岩石多已变质为板岩或千枚岩. 褶皱紧闭, 岩层陡立, 面理、同斜褶皱发育(图 2).

1.2.3　沉积盖层单元

在本区, 志留系-下泥盆统区域缺失. 从中泥盆世到中三叠世, 是一套稳定的滨海-陆棚相、海陆交互相沉积岩系. 主要由未变质、弱变形的化学沉积岩、碎屑岩夹煤系岩层组成. 工业煤层主要产在二叠系和上三叠统中. 其岩石组合、生物群落与江南地区基本一致. 其中, 中泥盆统跳马涧组以灰-灰白色、紫红色砾岩、砂砾岩和粗砂岩为特征, 区域不整合覆盖在奥陶系、寒武系或震旦系岩层之上.

2　样品制备与测试

2.1　样品采集

赣南是华南东段早古生代岩层露头连续、分布范

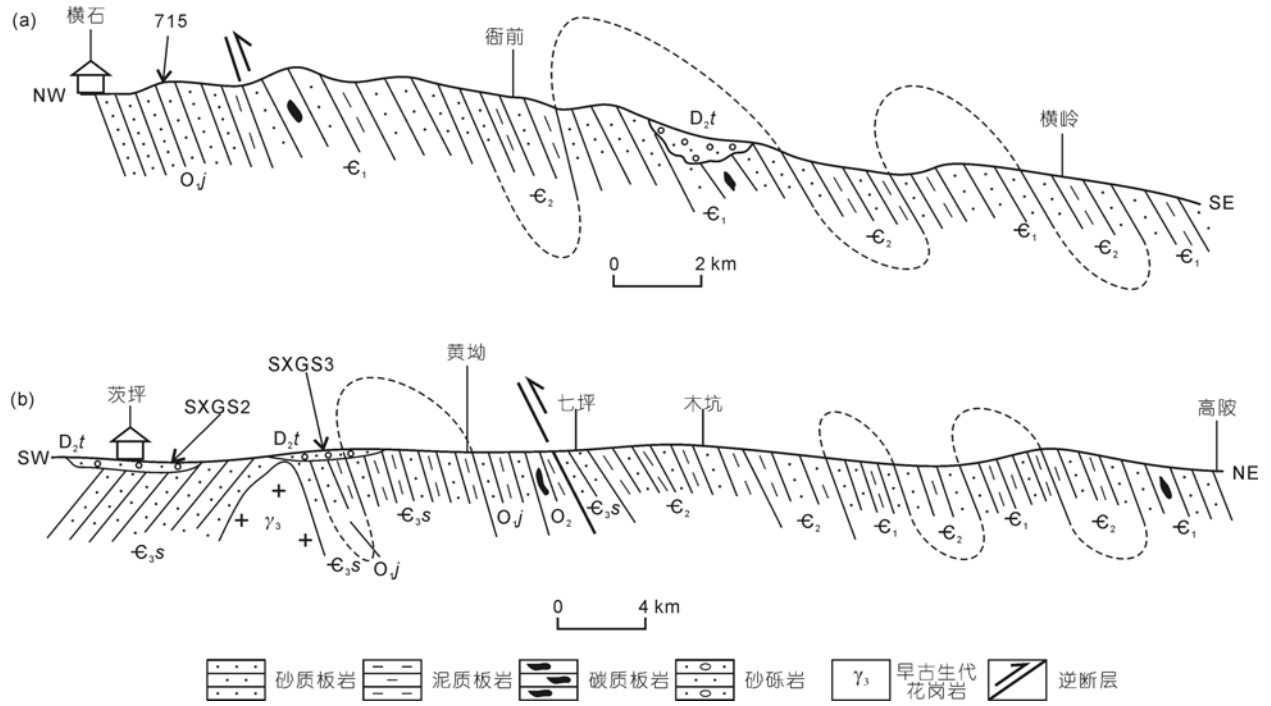


图 2　赣南早古生代地层与构造剖面图

(a) 遂川县横石-横岭; (b) 井冈山市茨坪-遂川县高陂

围最大的区段. 笔者对其进行了系统的地质调查和采样工作(图 2). 在薄片观察的基础上, 从中挑选出 5 件变余砂岩、杂砂岩样品进行碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测年工作. 其中 1 件样品(715)采自下奥陶统罗霄山沟组, 为长石石英砂岩; 其余 4 件样品(SXGS1~SXGS4)采自中泥盆统跳马涧组下部, 岩性为粗砂岩、石英粗砂岩、复成分石英砂岩. 其采样地点、GPS 位置与野外地质特征, 见图 2 和表 1.

2.2　样品制备及测试方法

岩石样品在河北廊坊市诚信地质服务公司进行粉碎, 并用人工重砂法从样品中分选出锆石. 挑选晶型完好、透明度好、无明显包裹体、无明显破裂的锆石颗粒, 用环氧树脂固定并抛光, 使锆石颗粒露出核部. 然后拍摄透射光和反射光照片, 并进行阴极发光(CL)照相. CL 图像拍摄工作在西北大学大陆动力学国家重点实验室用安装有 Mono CL3+(Gatan, U.S.A.)的扫描电镜(Quanta 400 FEG)完成.

CL图像显示样品锆石大小不等, 部分呈次棱角状-混圆状(图 3), 反映它们经过一定距离的搬运与磨蚀. 不少锆石具有完好的晶形, 表明它们为近源搬运. 自形锆石多数发育岩浆结晶韵律环带, 且绝大部分锆石(97%)的Th/U比值都大于 0.4, 只有 4 个小于 0.1. 一般认为Th/U 比值大于 0.4 的锆石是岩浆成因, 而Th/U比值低者(<0.1)被认为是变质成因的[40]. 所以, 本次测试的锆石以岩浆成因为主. 另外存在 5%左右(约 20 粒)的锆石由暗色核部和亮色宽边两部分组成, 指示后期构造-岩浆作用对早先形成锆石的改造, 反映前泥盆纪经历了多期构造-热事件.

LA-ICP-MS锆石U-Pb定年工作在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室开展, 使用和Agilent 7500a ICP-MS连接起来的New Wave 213 nm激光取样系统完成. 分析过程中, 激光束斑直径采用 30 μm. 样品经剥蚀后, 由He气作为载气, 再和Ar气混合后进入ICP-MS进行分析. U-Pb同位素分馏用澳大利亚锆石标样GEMOC GJ-1($^{207}Pb/^{206}Pb$年龄为(608.5±1.5) Ma[41])来校正; 用锆石标样Mud Tank(截距年龄为(732±5) Ma[42])作为内标, 以保证测试分析精度. U-Pb年龄和U, Th和Pb的计数由GLITTER软件(4.4 版本)(www.mq.edu.au/GEMOC)在线获得. 详细的分析方法和流程与前人描述过的相类似[41,43,44]. 因为 ^{204}Pb 的信号低, 以及载气中 ^{204}Hg

表 1　样品采集位置与地质特征

样品号	采样地点	GPS 坐标	地层	岩性	备注
715	遂川县横石村	26°35′26″N 114°24′44″E	O_1j (爵山沟组)	长石石英砂岩	斜层理发育, 指示层序倒转
SXGS1	泰和县楠木度假村	26°48′04″N 114°30′56″E	D_2t (跳马涧组)	粗砂岩	位于不整合面上
SXGS2	井冈山茨坪	26°33′72″N 114°10′19″E	D_2t (跳马涧组)	粗砂质板岩	位于不整合面上
SXGS3	井冈山王家坪	26°32′93″N 114°10′57″E	D_2t (跳马涧组)	石英粗砂岩	位于不整合面上
SXGS4	信丰县龙回乡	25°31′87″N 114°47′95″E	D_2t (跳马涧组)	复成分石英砂岩	覆盖于花岗岩之上

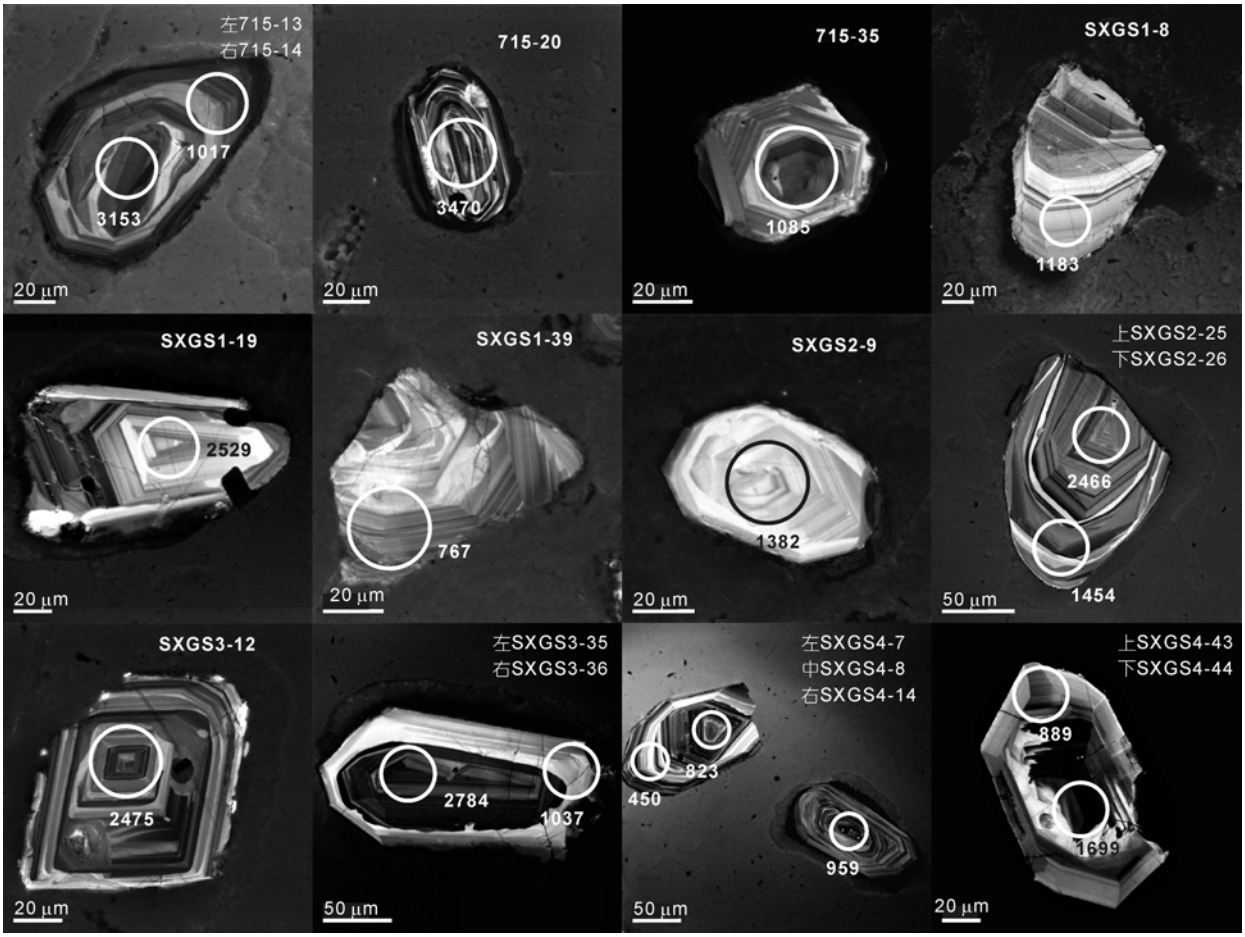


图 3　部分代表性锆石阴极发光图像

图中圆圈代表测年位置, 附近的数据为年龄值(单位: Ma)

的干扰, 该方法不能直接精确测得其含量, 因此, 使用嵌入EXCEL的ComPbCorr#3_15G程序[45]来进行普通铅校正. 最后用Isoplot程序(2.49 版本)[46]作碎屑锆石年龄频率直方图与年龄谐和图.

运用上述流程, 本次对碎屑锆石进行了系统的LA-ICP-MS U-Pb 同位素数据测试. 其数据结果列于网络版附表(earth.scichina.com).

2.3　LA-ICP-MS 测试结果

对采自爵山沟组岩层中的 715 号样品 50 粒碎屑锆石进行了U-Pb定年测试. 结果显示, 数据的年龄变化区间较大, 为 3470~523 Ma, 说明岩石中的锆石

是多来源的. 这些锆石大多具有较好的谐和性, 在$^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$投影图上绝大多数落在谐和线上或者附近(图 4), 这些谐和线上的锆石年龄即可代表它们的真实形成年龄. 少数数据的不谐和性大于10%, 投影点偏离谐和线, 它们的真实年龄则应老于$^{207}Pb/^{206}Pb$ 表面年龄. 在 715 号样品碎屑锆石数据的

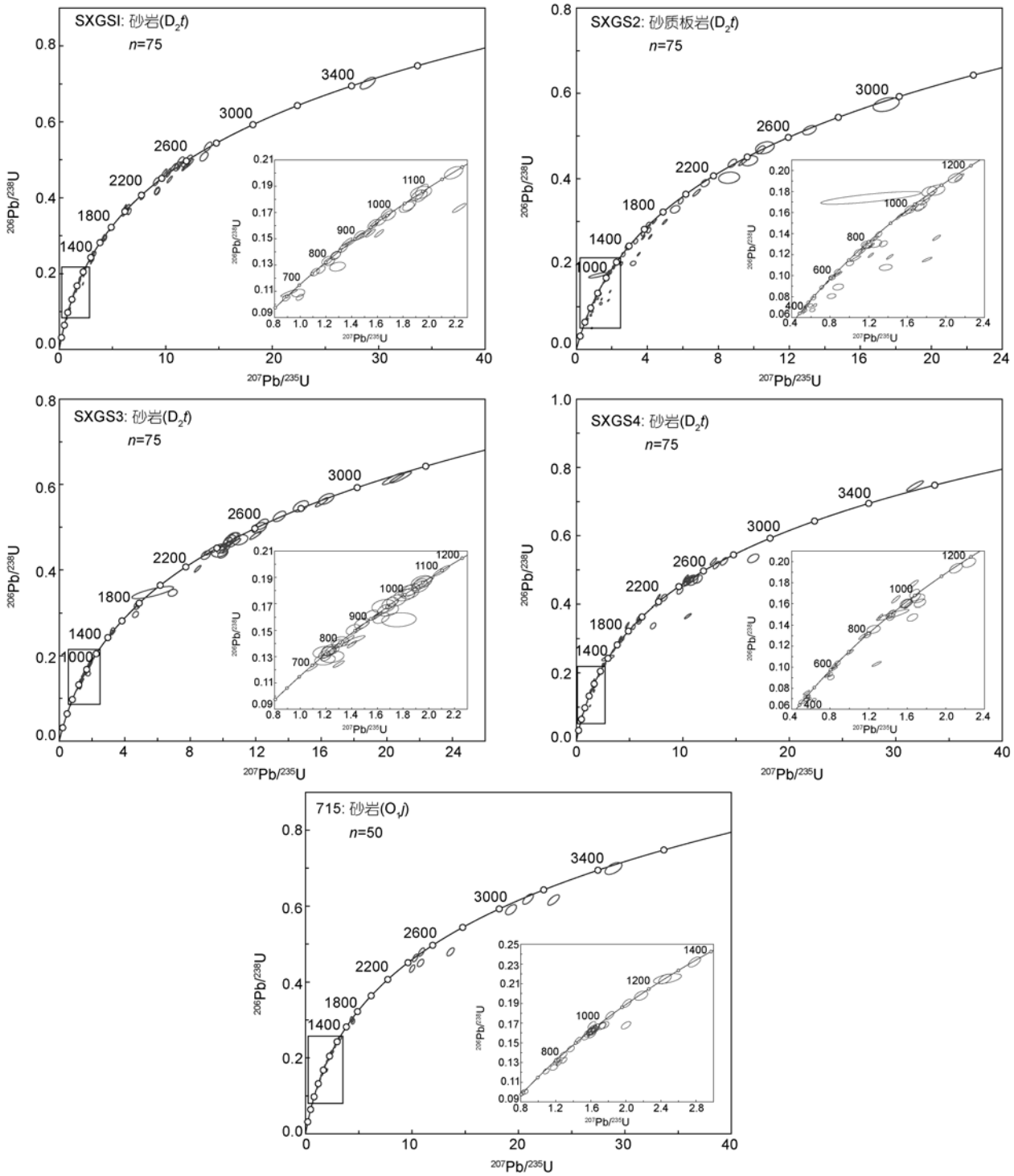


图 4　五件样品碎屑锆石的 U-Pb 谐和图

年龄频率直方图上(图 5(b)), 绝大多数测年数据集聚成三个峰. 最显著的年龄峰位于 1000 Ma 左右, 其次是形成于 800 Ma 左右的次高峰以及形成于 2450 Ma 左右的峰.

值得注意的是, 在这 50 组数据中, 测年值大于 30 亿年的且不谐和性小于 10%的有 4 组, $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄分别是 (3100±25), (3153±20), (3330±18) 和 (3470±25) Ma. 它们要么来自锆石的核部即继承锆石, 要么来自磨圆的锆石, 这些碎屑锆石很可能经历了一次或多次搬运和再循环过程. 它们的原始源区位置难以确定. 但是, 这些大于 30 亿年数据的出现, 至少说明华夏陆块岩石中已经记录到了源自太古代剥蚀区遗留下来的物质信息, 对今后研究不无启迪.

另有 3 颗锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄分别为 (616±10), (608±9)和(523±7) Ma(谐和度>90%), 是本次测试捕获到的全球泛非事件的特征年龄值信息. “泛非事件”是在莫桑比克洋闭合时, 东、西冈瓦纳逐步聚合, 并最终形成冈瓦纳大陆的过程, 主要发生于 600~550 Ma之间[47].

采自跳马涧组岩层中的 4 件样品(SXGS1~SXGS4), 通过测试共获得 300 组数据(网络版附表). 其中 263 组数据谐和性较好, 在投影图上均落在谐和线上或附近(图 4). 由于捕获了较多早古生代构造-岩浆事件的信息, 跳马涧组各个样品的年龄变化区间较爵山沟组的略宽: SXGS1: 3468~503 Ma; SXGS2: 2985~408 Ma; SXGS3: 3153~530 Ma; SXGS4: 3518~419 Ma, 进一步说明华南东段岩石中含有丰富的古构造信息, 蚀源区物质成分复杂.

将 263 组数据投影到年龄频率直方图中(图 5(c)), 可以明显看到, 跳马涧组所包含的前寒武纪地壳演化信息和爵山沟组的几乎完全一样. 不同的是跳马涧组碎屑锆石清晰记录到了一期发生在早古生代晚期的构造-岩浆事件. 19 组数据分布在 450~401 Ma 区间, 谐和性好.

按年龄峰值大小, 可依次排序为 800, 1000, 2500, 450, 650~500 和 1650~1450 Ma.

在中泥盆世跳马涧组中的锆石中也捕获到了蚀源区太古代岩石的年龄信息, 测年值大于 28 亿年且不谐和性小于 10%的有 9 组, 其中最老的锆石年龄为 (3518±11) Ma(样品 SXGS4-74), 为半自形、单一结构的锆石(图 3), 是出现在研究区最老源区岩石的信息. 结合上述早奥陶世爵山沟组中的 4 组 30 亿年年龄信息, 其太古代年龄信息量不能算少. 这些锆石的成因可能较复杂, 尚待深入研究.

3　结果解释及结论

3.1　结果解释

把 312 组谐和性较好的前寒武纪年龄数据投影在一个直方图上(图 5(a)), 构成了前泥盆纪的多期构造演化信息. 按年龄峰值大小, 可依次排序为: 1100~900 Ma(峰值 980 Ma)、900~700 Ma(峰值 800 Ma)、2600~2300 Ma(峰值 2470 Ma)、450~400 Ma(峰值 440 Ma)、650~520 Ma(峰值 580 Ma)、1650~1450 Ma.

首先, 5 件样品中锆石年龄最集中的位置是在 1100~900 Ma, 表现在频率直方图上是在~980 Ma 形成了一个最明显的峰值. 这个时间与全球 Grenville 造山期大致相当. 实际上, 前人在华夏地块南部的研究中, 已发现众多 Grenville 期年龄信息的存在. 例如,

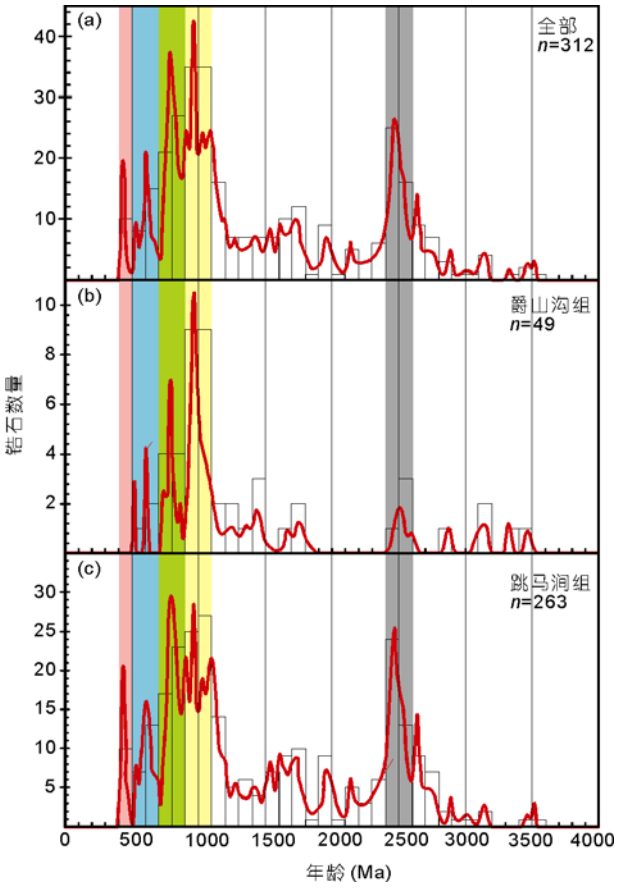


图 5　五件样品碎屑锆石的年龄频率直方图

在研究区南侧的广东兴宁县径南, 出露有SHRIMP岩浆锆石U-Pb年龄为(972±8) Ma的变质流纹岩[48]; 赣南鹤仔地区发育的片麻状花岗闪长岩, 其锆石Pb-Pb蒸发法年龄为(996±29) Ma[49]. 于津海等[26,50,51]通过对粤中增城和赣南鹤仔 3 件基底变质岩测年获得了1000~900 Ma的变质年龄, 在粤北南雄地区和闽西北建阳地区新元古代变质沉积岩中获取了大量年龄值为 1000 Ma左右的碎屑锆石, 粤中和平县古寨花岗闪长岩中也存在不少 1070~910 Ma的继承锆石; 覃小锋等[52]在广东云开大山的云开群变质岩中获得的锆石年龄值变化于 1035~900 Ma. 综合这些资料, 我们可以推测华南南部很可能曾经存在一个Grenville期的造山带. 这些年龄信息为前人提出的新元古代华夏和扬子陆块曾发生过拼贴聚合事件的认识提供了参考依据.

第二, 本次测年数据的第二个峰值是~800 Ma, 在频率直方图上此年龄形成一个次高峰值, 这个时间与全球Rodinia超大陆裂解事件的时间基本相同. 可视为研究区对该事件的响应. 在华南的许多地方, 这一裂解事件的物质表现以及构造形迹是非常明显的. 例如, 在华南武夷、赣中-赣南、南岭、云开等地古陆残块中发育的新元古代辉长岩、辉绿岩、花岗岩, 规模较大的新元古代南华纪裂谷盆地等[53], 就是此期裂解作用的产物. Li等[53]提出, 扬子与华夏陆块在 9 亿年左右聚合, 形成华南陆块; 825 Ma以来, 与Rodinia超大陆裂解作用同步, 华南地块发生裂解, 其成因可能与成冰纪的地幔岩浆上涌有关[9,13].

第三, 谐和性较好的263组年龄数据承载了相当比例的新太古代晚期-古元古代早期的年龄信息, 年龄峰值为 2470 Ma. 这一年龄峰信息在华南其他地区也有报道. 如在闽西北, 通过对许多变质地层内的继承锆石U-Pb测年, 发现多组年龄集中在 2500 Ma左右[51]; 在南岭一些基底变质岩地区, 碎屑锆石年龄谱中出现了 2500 Ma左右的峰值[26,54,55]. 这个年龄峰与全球新太古代晚期古陆核生长事件基本一致. 本次测试捕捉到的这个古构造信息, 对深入开展华夏陆块基底的早期演化是有借鉴价值的.

第四个年龄峰值为 440 Ma. 这一年龄段正是全球各地褶皱造山-岩浆活动的高峰期. 在西欧英国-挪威一带, 称加里东事件; 在北美阿帕拉契地区, 称塔康事件; 在中国南方和西部也都有明显表现[47]. 在CL图像上, 这些锆石的晶形较完整, 韵律环带清晰, 且Th/U比值较高, 指示其为岩浆成因; 这和地表出露的、具有相同年龄段的大量花岗岩体这一事实非常吻合. 如赣南上犹县陡水岩体、南康市龙回岩体、井冈山市宁冈岩体、赣中的山庄岩体和慈竹岩体等, 其岩浆锆石U-Pb年龄集中在 440~400 Ma[18,56,57]. 跳马涧组样品的部分锆石应该就是这些岩体快速剥蚀、搬运堆积的产物.

此外, 在年龄频率直方图上, 可以见到一个650~520 Ma的年龄时段(19组年龄数据)(网络版附表, 图 5), 峰值为 580 Ma, 对应于使东、西冈瓦纳等陆块拼贴聚合的泛非事件. 说明华夏或者邻区当时对泛非事件的响应是比较显著的; 华夏与冈瓦纳陆块有一定的亲缘性.

另外, 本次测试获得 13 组大于 2800 Ma且谐和性较好的锆石年龄数据. 其中 2 颗锆石年龄分别为(3470±25)和(3518±11) Ma, 谐和性为 98%和 102%. 这是赣南地区至今所知的最古老的年龄信息. 在研究区的西侧, 前人在粤北南雄地区一件副片麻岩中也发现了三颗形成于~3300 Ma和一颗形成于~3800 Ma的继承锆石[26]; 在南岭带中, 曾经发现多颗形成于 3500~2500 Ma的碎屑锆石[24]. 这些年龄信息的发现, 对开展进一步的研究是有益处的.

最后, 还获得一个较宽区段的年龄谱: 1650~1450 Ma, 与劳伦斯花岗岩-流纹岩省的特征年龄值[13]相当. 它们的构造意义或许能与发生在劳伦斯陆块上的裂谷作用相联系.

3.2 华南在全球构造中的位置: 陆块亲缘性探讨

利用近 10 多年发表的大量较高质量测年数据[7,24,25,44,48,58~64], 大致可以在华南东段圈定出几个元古代古陆残块的露头范围, 即分布于浙西南-闽西北地区的武夷块体和赣南-湘南-粤北的南岭块体(包括赣中-赣南区段). 这些残块具有一定范围, 元古代岩石组合发育. 其中, 南岭块体的年龄谱要比武夷块体老. 据此可以概略恢复并重建为一个更大的块体——华夏陆块, 推测是元古代Rodinia大陆的一部分[13,65]. 鉴于各个残块之间虽有南华纪-早古生代沉积区分布, 但地层序列中并不含有火山岩以及洋壳碎块, 因而认为发生在 825 Ma以来的Rodinia大陆裂解事件, 在该区只是一种地壳范围内的伸展减薄, 并未发生岩石圈尺度的裂解[19]. 这是笔者特别强调的一个地质事实. 近年的古地磁研究表明, 自新元古代成冰纪到中泥盆

世(750~380 Ma), 华南并未发生岩石圈的裂离[66]. 本文的认识与该成果是一致的.

图 6 展示了本研究区(华夏北部)与华夏南部以及世界其他 7 个地区[67~83]前寒武纪年龄谱的对比. 从中可以看出, 本研究区和华夏南部的年龄谱基本上是一致的. 不仅峰值时间相似, 而且源区时间下限也基本相同, 表明华夏南北两部份均属同一块体.

和印度东部-南极洲东部块体相比, 其两个主峰(~2500, ~950 Ma)、一个次级峰(~3300 Ma)和两个小峰(~550, ~1650 Ma)都能在研究区找到很好的对应, 唯一不同的是印度东部-南极洲东部块体缺少~800 Ma 裂解期的信息. 推测正是这次全球裂解事件, 造成了该块体与华夏块体的大规模分离.

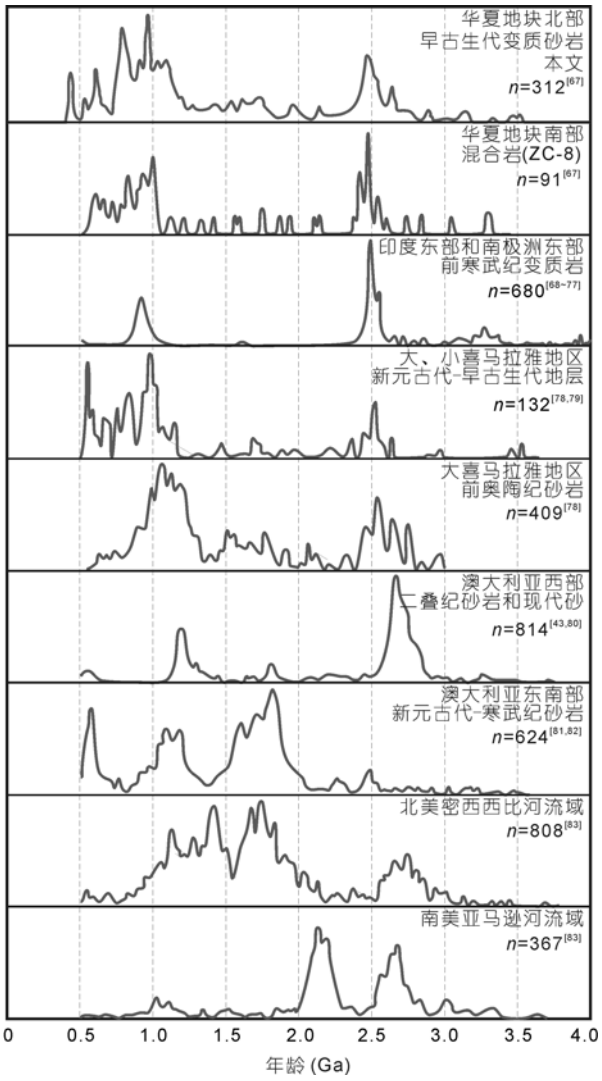


图 6　研究区(华夏北部)与华夏南部以及世界各地前寒武纪年龄谱对比

年龄对比的数据来源据文献[67~83]

对比最好的是大、小喜马拉雅块体, 其 5 个年龄峰值(约 980 Ma, 约 800 Ma, 约 2480 Ma, 700~500 Ma, 约 1700 Ma), 和研究区的非常一致, 表明两者具有密切的亲缘性.

和澳大利亚西部相比, 存在两点显著差异: (1) 西澳块体缺失~800 Ma 超大陆裂解期的信息; (2) 西澳块体的 2 个主峰(~2700, ~1200 Ma)在研究区找不到对应值.

和澳大利亚东南部的差别则是: (1) 该区缺失~800 Ma 超大陆裂解事件的信息; (2) 其 2 个主峰(~1800, ~1200 Ma), 在华夏北部或南部都没有对应的年龄值. 推测该区 Rodinia 聚合时间要比华夏早得多.

最后, 研究区和南美块体、北美块体无论是在发生重大构造事件的时间上, 还是在地壳演化上都有显著差异, 不能对比. 南美是形成于 2700~2000 Ma 的古老克拉通块体, 北美则是形成于~2700 和 1800~1200 Ma 的古老块体.

综上所述, 赣南地区锆石样品中前寒武纪年龄频率直方图和华夏南部一致, 和印度东部-南极东部块体及大、小喜马拉雅块体比较相似, 两者之间存在较好的亲缘性. 和澳大利亚西部、澳大利亚东南部、南美及北美块体明显不一致.

3.3　结论

(1) 赣南地区位于华夏北部, 震旦系-奥陶系层序连续, 露头良好. 通过对采自爵山沟组和跳马涧组的 5 件粗砂岩样品碎屑锆石的 U-Pb 定年, 获得丰富的古构造信息, 反映华夏或者邻区从太古代到泥盆纪曾经经历过多期构造-岩浆事件.

(2) 最强烈的构造事件发生在~1000 Ma, 对应全球 Grenville 期造山作用. 该事件使华夏地块与扬子地块拼合, 成为全球 Rodinia 超大陆的一部分. 另一次强烈的事件发生在~800 Ma, 是研究区对全球 Rodinia 超大陆裂解的响应. 但是, 地质证据表明, 在华夏块体内部, 它只是一种岩石圈板块上部的伸展裂陷. 第三个有意义的构造-岩浆事件发生在 450~400 Ma, 对应于研究区早古生代晚期发生的强烈褶皱造山和岩浆活动. 另外, ~2500 Ma 的年龄峰值则可能揭示研究区或邻区未知块体曾经经历过古元古代早期的构造-岩浆事件.

(3) 本次测试还追踪到泛非事件的构造迹象, 其年龄时段为 650~500 Ma(19 组数据). 虽然此事件在华南地表无明显表现, 但反映华夏块体在当时曾经受到过泛非事件的影响.

(4) 对比表明, 研究区年龄谱和华夏南部的基本一致, 表明前寒武纪华夏南北两区属于同一块体. 印度东部-南极洲东部块体除缺少~800 Ma 裂解期的年龄信息之外, 其他方面都能与研究区相对比. 推测发生在~800 Ma 的裂解事件, 是造成了它与研究区分离的原因. 对比最好的是大、小喜马拉雅块体, 其构造-岩浆事件发生的时间与期次和研究区的非常一致, 表明两者在前寒武纪是彼此相连的.

致谢 衷心感谢孙枢教授、张国伟教授对本文通讯作者的支持与帮助. 感谢两位匿名审稿人对本文提出的重要修改意见. 制样与测年以及数据处理得到王博博士的大力帮助, 江西地调局杨明贵、陈祥云和楼法生等教授级高工提供了诸多宝贵建议和野外考察便利, 一并致谢.

参考文献

1 徐克勤, 刘英俊, 俞受均, 等. 江西南部加里东期花岗岩的发现. 地质论评, 1960, 20: 112—114
2 郭令智, 俞剑华, 施央申. 华南加里东地槽褶皱区大地构造发展的基本特征. 见: 陈国达, 著. 中国大地构造问题. 北京: 科学出版社, 1965. 165—183
3 Guo L Z, Shi Y S, Ma R S. Geotectonic framework and crust evolution of the South China. Scientific Papers on Geology for International Exchange (I). Beijing: Geological Publishing House, 1980. 109—116
4 郭令智. 华南板块构造. 北京: 地质出版社, 2001. 1—264
5 周洪瑞. 赣东北皖南晚元古代地层与构造古地理. 见: 王鸿祯, 主编. 华南地区古大陆边缘构造史. 武汉: 武汉地质学院出版社, 1986. 173—182
6 周新民, 朱云鹤. 江绍断裂带的岩浆混合作用及其两侧的前寒武纪地质. 中国科学 B 辑, 1992, 22: 296—303
7 Li X H. Timing of the Cathaysia block formation: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon geochronology. Episodes, 1997, 20: 188—192
8 Li X H, Li Z X, Zhou H, et al. 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. Precambrian Res, 2002, 113: 135—154
9 Li X H, Li Z X, Ge W, et al. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ac. 825 Ma? Precambrian Res, 2003, 122: 45—83
10 Li Z X, Zhang L H, Powell C M A. South China in Rodinia: Part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia? Geology, 1995, 23: 407—410
11 Li Z X, Zhang L H, Powell C M A. Positions of the East Asian cratons in the Neoproterozoic supercontinent Rodina. Aust J Earth Sci, 1996, 43: 593—604
12 Li Z X, Li X H, Zhou H, et al. Grenvillian continental collision in South China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia. Geology, 2002, 30: 163—166
13 Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. Precambrian Res, 2003, 122: 85—109
14 Li W X, Li X H, Li Z X. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance. Precambrain Res, 2005, 136: 51—66
15 Zhang S H, Jiang G Q, Zhang J M, et al. U-Pb sensitive high-resolution ion microprobe ages from the Doushantuo Formation in south China: Constraints on Late Neoproterozoic glaciations. Geology, 2005, 33: 473—476
16 袁宗信, 吴良士, 张宗清, 等. 闽北麻源群 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素年龄研. 岩石矿物学杂志, 1991, 2: 127—132
17 邓平, 舒良树, 肖旦红. 中国东南部晚中生代火成岩的基底探讨. 高校地质学报, 2002, 8: 169—179
18 舒良树. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带. 高校地质学报, 2006, 12: 418—431
19 舒良树, 于津海, 贾东, 等. 华南东段早古生代造山带研究. 地质通报, 2008, 27: 1581—1593
20 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 等. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社, 1990. 1—205
21 李继亮. 东南大陆岩石圈结构与地质演化. 北京: 冶金工业出版社, 1993. 1—264
22 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 等. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分. 地球科学, 1999, 24: 1—12
23 Zhou J C, Wang X L, Qiu J S. Geochronology of Neoproterozoic mafic rocks and sandstones from northeastern Guizhou, South China: Coeval arc magmatism and sedimentation. Precambrian Res, 2009, 170: 27—42

24 徐夕生, 邓平, O'Reilly S Y, 等. 华南贵东杂岩体单颗粒锆石激光探针 ICPMS U-Pb 定年及其成岩意义. 科学通报, 2003, 48: 1328—1334

25 于津海, 周新民, O'Reilly Y S, 等. 南岭东段基底麻粒岩相变质岩的形成时代和原岩性质: 锆石的 U-Pb-Hf 同位素研究. 科学通报, 2005, 50: 1758—1767

26 于津海, O'Reilly S Y, 王丽娟, 等. 华夏地块古老物质的发现和前寒武纪地壳的形成. 科学通报, 2007, 52: 11—18

27 郭令智, 施央申, 马瑞士. 华南大地构造格架和地壳演化. 国际交流地质学术论文集(1). 北京: 地质出版社, 1980. 109—116

28 舒良树, 施央申, 郭令智, 等. 江南中段板块-地体构造与碰撞造山运动学. 南京: 南京大学出版社, 1995. 1—174

29 Li X H. U-Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze block: Timing of the Neoproterozoic Jinning orogeny in SE China and implications for Rodinia. Precambrain Res, 1999, 97: 43—57

30 舒良树, 卢华复, Charvet J, 等. 武夷山北缘断裂带运动学研究. 高校地质学报, 1997, 3: 282—292

31 郭令智. 华南板块构造. 北京: 地质出版社, 2001. 1—264

32 Shu L S, Charvet J. Kinematic and geochronology of the Proterozoic Dongxiang-Shexian ductile shear zone (Jiangnan region, South China). Tectonophysics, 1996, 267: 291—302

33 Charvet J, Shu L S, Shi Y S, et al. The building of South China: Collision of Yangzi and Cathaysia Block, problems and tentative answers. J Southeast Asian Earth Sci, 1996, 13: 223—235

34 Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B. Rift melting of juvenile arc-derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan orogen, South China. Precambrian Res, 2008, 163: 351—383

35 Li W X, Li X H, Li Z X. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance. Precambrain Res, 2005, 136: 51—66

36 Shu L S, Faure M, Wang B, et al. Late Paleozoic-early Mesozoic geological features of South China: Response to the Indosinian collision Event in Southeast Asia. C R Geosci, 2008, 340: 151—165

37 江西省地质矿产局. 江西省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1984. 1—921

38 Shu L S, Faure M, Jiang S Y, et al. SHRIMP zircon U-Pb age, litho- and biostratigraphic analyses of the Huaiyu Domain in South China-Evidence for a Neoproterozoic orogen, not Late Paleozoic-Early Mesozoic collision. Episodes, 2006, 29: 244—252

39 楼法生, 沈渭洲, 王德滋, 等. 江西武功山穹隆复式花岗岩的锆石 U-Pb 年代学研究. 地质学报, 2005, 79: 636—644

40 Corfu F, Hanchar J M, Hoskin P W O, et al. Altas of zircon textures. Rev Mineral Geochem, 2003, 53: 469—500

41 Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al. The application of laser ablation microprobe-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LAM-ICP-MS) to *in situ* U-Pb zircon geochronology. Chem Geol, 2004, 211: 47—69

42 Black L P, Gulson B L. The age of the Mud Tank carbonatite, Strangways Range, Northern Territory. BMR J Aust Geol Geophys, 1978, 3: 227—232

43 Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, et al. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons. Precambrian Res, 2004, 131: 231—282

44 Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, et al. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia blocks. Precambrian Res, 2007, 159: 117—131

45 Andersen T. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb. Chem Geol, 2002, 192: 59—79

46 Ludwig K R. Users Manual for Isoplot/Ex (rev. 2. 49): A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronol Center Spec Publ, 2001, 1: 55

47 陆松年. 初论"泛华夏造山作用"与加里东和泛非造山作用的对比. 地质通报, 2004, 23: 952—958

48 舒良树, 邓平, 于津海, 等. 武夷山西缘流纹岩的形成时代及其地球化学特征. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 51: 1053—1063

49 刘邦秀, 刘春根, 邱永泉. 江西南部鹤仔片麻状花岗岩类 Pb-Pb 同位素年龄及地质意义. 火山地质与矿产, 2001, 22: 264—268

50 王丽娟, 于津海, O'Reilly S Y, 等. 华夏南部可能存在 Grenville 期造山作用: 来自基底变质岩中锆石 U-Pb 定年及 Lu-Hf 同位素信息. 科学通报, 2008, 53: 1680—1692

51 Wan Y S, Liu D Y, Xu M H, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology and geochemistry of metavolcanic and metasedimentary rocks in Northwestern Fujian, Cathaysia Block, China: Tectonic implications and the need to redefine lithostratigraphic units. Gondwana Res, 2007, 12: 166—183

52 覃小锋, 潘元明, 李江, 等. 桂东南云开地区变质杂岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学. 地质通报, 2006, 25: 553—559

53 Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China. Earth Planet Sci Lett, 1999, 173: 171—181

54 于津海, 王丽娟, O'Reilly S Y, 等. 赣南存在古元古代基底: 来自上犹陡水煌斑岩中捕虏锆石的 U-Pb-Hf 同位素证据. 科学通报, 2009, 54: 898—905

55 于津海, 王丽娟, 周新民, 等. 粤东北基底变质岩的组成和形成时代. 地球科学, 2006, 31: 38—48

56 张芳容, 舒良树, 王德滋, 等. 华南东段加里东期花岗岩类形成构造背景探讨. 地学前沿, 2009, 16: 248—260
57 沈渭洲, 张芳荣, 舒良树, 等. 江西宁冈岩体的形成时代、地球化学特征及其构造意义. 岩石学报, 2008, 24: 2244—2254
58 程海, 胡世玲, 唐朝辉. 赣东北铁砂街群同位素年代. 地质通报, 1991, 2: 151—153
59 李曙光, 陈移之, 葛宁洁, 等. 浙西南八都群变火山岩系及变晶糜棱岩的同位素年龄及其构造意义. 岩石学报, 1996, 12: 79—87
60 李献华, 王一先, 赵振华, 等. 闽浙古元古代斜长角闪岩的离子探针锆石 U-Pb 年代学. 地球化学, 1998, 27: 327—334
61 甘晓春, 李惠民, 孙大中. 浙西南古元古代花岗质岩石的年代. 岩石矿物学杂志, 1995, 14: 1—8
62 甘晓春, 赵凤清, 金文山, 等. 华南火成岩中捕获锆石的早元古代-太古宙 U-Pb 年龄信息. 地球化学, 1996, 25: 112—119
63 胡雄健. 浙西南下元古界八都群的地质年代学. 地球化学, 1994, 23(增刊): 18—24
64 Li X H, Li Z X, Sinclair J A, et al. Revisiting the "Yanbian Terrane": Implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze Block, South China. Precambrian Res, 2006, 151: 14—30
65 Li Z X, Wartho J, Occhipinti S, et al. Early history of the eastern Sibao Orogen (South China) during the assembly of Rodinia: New mica $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating and SHRIMP U-Pb detrital zircon provenance constraints. Precambrian Res, 2007, 159: 79—94
66 Yang Z Y, Sun Z M, Yang T, et al. A long connection (750—380 Ma) between South China and Australia: Paleomagnetic constraints. Earth Planet Sci Lett, 2004, 220: 423—434
67 Yu J H, O'Reillyb, Wang L J, et al. Where was South China in the Rodinia supercontinent? Evidence from U-Pb geochronology and Hf isotopes of detrital zircons. Precambrian Res, 2008, 164: 1—15
68 Harley S L, Black L P. A revised Archaean chronology for the Napier Complex, Enderby Land from SHRIMP ion-microprobe studies. Antar Sci, 1997, 9: 74—91
69 Mishra S, Deomurari M P, Wiedenbeck M, et al. $^{207}Pb/^{206}Pb$ zircons ages and the evolution of the Singhbhum Craton, eastern India: An ion microprobe study. Precambrian Res, 1999, 93: 139—151
70 Boger S D, Carson C J, Wilson C J L, et al. Neoproterozoic deformation in the Radok Lake region of the northern Prince Charles Mountains, east Antarctica: Evidence for a single protracted orogenic event. Precambrian Res, 2000, 104: 1—24
71 Jayananda M, Moyen J F, Martin H, et al. LateArchaean (2550—2520 Ma) juvenile magmatism in the Eastern Dharwar craton, southern India: Constraints fromgeochronology, Nd-Sr isotopes and whole rock geochemistry. Precambrian Res, 2000, 99: 225—254
72 Fitzsimons I C W. Grenville-age basement provinces in East Antarctica: Evidence for three separate collisional orogens. Geology, 2000, 28: 879—882
73 Kelly N M, Clarke G L, Fanning C M. A two-stage evolution of the Neoproterozoic Rayner structural episode: New U-Pb sensitive high resolution ion microprobe constraints from the Oygarden Group, Kemp Land, East Antarctica. Precambrian Res, 2002, 116: 307—330
74 Carson C J, Ague J J, Coath C D. U-Pb geochronology from Tonagh Island, East Antarctica: Implications for the timing of ultra-high temperature metamorphism of the Napier complex. Precambrian Res, 2002, 116: 237—263
75 Mondal M E A, Goswami J N, Deomurari M P, et al. Ion microprobe $^{207}Pb/^{206}Pb$ ages of zircons from the Bundelkhand massif, northern India: Implications for crustal evolution of the Bundelkhand-Aravalli protocontinent. Precambrian Res, 2002, 117: 85—100
76 Hokada T, Misawa K, Shiraishi K, et al. Mid to late Archaean (3.3—2.5 Ga) tonalitic crustal formation and high-grade metamorphism at Mt. Riiser-Larsen, Napier Complex, East Antarctica. Precambrian Res, 2003, 127: 215—228
77 Hokada T, Misawa K, Yokoyama K, et al. SHRIMP andelectron microprobe chronology of UHT metamorphism in the Napier complex, East Antarctica: Implications for zircon growth at >1000℃. Contrib Mineral Petrol, 2004, 147: 1—20
78 Gehrels G E, DeCelles P G, Martin A, et al. Initiation of the Himalayan Orogen as an Early Paleozoic thin-skinned thrust belt. GSA Today, 2003, 13: 4—9
79 Myrow P M, Hughes N C, Paulsen T S, et al. Integrated tectonostratigraphic analysis of the Himalaya and implications for its tectonic reconstruction. Earth Planet Sci Lett, 2003, 212: 433—441
80 Veevers J J, Saeed A, Belousova E A, et al. U-Pb ages and source composition by Hf-isotope and trace-element analysis of detrital zircons in Permian sandstone and modern sand from southwestern Australia and a review of the paleogeographical and denudational history of the Yilgarn Craton. Earth Sci Rev, 2005, 68: 245—279
81 Ireland T R, Flottmann T, Fanning, C M, et al. Development of the Early Paleozoic Pacific margin of Gondwana from detrital-zircon ages across the Delamerian Orogen. Geology, 1998, 26: 243—246
82 Berry R, Jenner G A, Meffre S, et al. A North American provenance for Neoproterozoic to Cambrian sandstones in Tasmania? Earth Planet Sci Lett, 2001, 192: 207—222
83 Rino S, Komiya T, Windley B F, et al. Majore pisodic increases of continental crustal growth determined fromzircon ages of river sands: Implications for mantle overturns in the Early Precambrian. Phys Earth Planet Int, 2004, 146: 369—394

附表　碎屑锆石 U-Pb 年龄的 LA-ICP-MS 分析结果

样品号	同位素比值			年龄(Ma)			Th/U	谐和性
	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$		
715　26°35′26″N, 114°24′44″E								
715-1	0.27419±0.00316	23.29462±0.35699	0.61622±0.00903	3330±18	3239±15	3095±36	0.70	92
715-2	0.08694±0.00121	2.78105±0.04644	0.23202±0.00338	1359±27	1350±12	1345±18	1.12	99
715-3	0.07124±0.00126	1.56801±0.03075	0.15964±0.0024	964±37	958±12	955±13	1.25	99
715-4	0.07273±0.00102	1.64832±0.02762	0.16436±0.00238	1006±29	989±11	981±13	1.61	97
715-5	0.05885±0.00107	0.68613±0.01358	0.08456±0.00123	562±41	530±8	523±7	3.76	93
715-6	0.06669±0.00115	1.21688±0.02334	0.13234±0.00195	828±37	808±11	801±11	1.59	97
715-7	0.07184±0.00105	1.59856±0.02752	0.16138±0.00234	981±30	970±11	964±13	1.47	98
715-8	0.07671±0.00104	2.01014±0.03351	0.19006±0.00279	1114±28	1119±11	1122±15	1.03	101
715-9	0.07197±0.00109	1.60974±0.02844	0.16222±0.00236	985±32	974±11	969±13	0.61	98
715-10	0.07202±0.00127	1.59751±0.03117	0.16088±0.00238	987±37	969±12	962±13	2.03	97
715-11	0.07227±0.00098	1.64241±0.02739	0.16483±0.00244	994±28	987±11	984±14	1.07	99
715-12	0.06906±0.00093	1.23425±0.02074	0.12964±0.00194	901±28	816±9	786±11	1.27	85
715-13	0.24506±0.00306	20.90159±0.32798	0.61864±0.00896	3153±20	3134±15	3105±36	0.62	98
715-14	0.07311±0.00106	1.62807±0.02864	0.16152±0.00244	1017±30	981±11	965±14	1.74	95
715-15	0.07358±0.00119	1.60993±0.03086	0.1587±0.00249	1030±33	974±12	950±14	0.59	92
715-16	0.17414±0.0029	10.80738±0.19796	0.45017±0.00638	2598±28	2507±17	2396±28	0.27	92
715-17	0.1649±0.00231	10.88914±0.18692	0.47896±0.00717	2507±24	2514±16	2523±31	0.77	101
715-18	0.06019±0.00118	0.82066±0.01762	0.0989±0.00153	610±43	608±10	608±9	3.69	100
715-19	0.06777±0.00126	1.28569±0.02616	0.1376±0.00207	862±39	839±12	831±12	1.13	96
715-20	0.30002±0.00472	28.92315±0.52403	0.69925±0.01038	3470±25	3451±18	3418±39	0.82	98
715-21	0.16698±0.00224	10.01859±0.16376	0.43519±0.00638	2528±23	2436±15	2329±29	0.32	91
715-22	0.06826±0.00155	1.17648±0.0279	0.12502±0.00194	876±48	790±13	759±11	1.22	85
715-23	0.08337±0.00376	2.47312±0.10501	0.21513±0.00331	1278±90	1264±31	1256±18	0.67	98
715-24	0.23703±0.00365	19.29818±0.33575	0.59051±0.00877	3100±25	3057±17	2991±36	0.96	96
715-25	0.06917±0.00094	1.45265±0.02439	0.15233±0.00226	904±29	911±10	914±13	0.49	101
715-26	0.07407±0.00107	1.81565±0.03154	0.17779±0.00265	1043±30	1051±11	1055±15	0.61	101
715-27	0.06959±0.00101	1.61034±0.02846	0.16784±0.00254	916±31	974±11	1000±14	0.97	108
715-28	0.07303±0.00119	1.6526±0.03109	0.16413±0.0025	1015±34	991±12	980±14	1.58	96
715-29	0.0826±0.00142	2.44543±0.047	0.21475±0.00322	1260±34	1256±14	1254±17	1.43	100
715-30	0.07966±0.00174	2.17281±0.04989	0.19786±0.0031	1189±44	1172±16	1164±17	1.35	98
715-31	0.06912±0.00126	1.37036±0.02666	0.14381±0.00204	902±38	876±11	866±11	0.63	96
715-32	0.07561±0.0015	1.75062±0.03609	0.16798±0.0024	1085±41	1027±13	1001±13	0.78	92
715-33	0.07496±0.00108	1.7249±0.02791	0.16692±0.00223	1067±30	1018±10	995±12	0.74	93
715-34	0.16123±0.00221	10.30481±0.16498	0.46353±0.00661	2469±24	2463±15	2455±29	2.30	99
715-35	0.07155±0.00124	1.54122±0.02883	0.15626±0.00221	973±36	947±12	936±12	1.18	96
715-36	0.10704±0.00145	4.42142±0.06977	0.29959±0.00412	1750±25	1716±13	1689±20	1.13	96
715-37	0.10274±0.00138	4.27993±0.06926	0.30211±0.0043	1674±25	1690±13	1702±21	0.68	102
715-38	0.07095±0.00097	1.29258±0.02129	0.13213±0.0019	956±29	842±9	800±11	0.93	81
715-39	0.06709±0.00134	1.20911±0.0255	0.13073±0.00189	841±43	805±12	792±11	1.39	94
715-40	0.07145±0.00121	1.59571±0.03113	0.16198±0.00252	970±35	969±12	968±14	0.49	100
715-41	0.09143±0.00133	3.07722±0.05149	0.2441±0.00344	1456±28	1427±13	1408±18	0.79	97
715-42	0.07497±0.00116	1.72629±0.03009	0.16702±0.00235	1068±32	1018±11	996±13	0.97	93
715-43	0.09034±0.00136	3.1139±0.05424	0.25003±0.00366	1433±29	1436±13	1439±19	1.37	100
715-44	0.0922±0.00409	3.18139±0.13253	0.25025±0.00383	1472±86	1453±32	1440±20	0.62	98
715-45	0.07154±0.00122	1.61948±0.03092	0.16421±0.00245	973±36	978±12	980±14	1.18	101
715-46	0.06521±0.0013	1.08912±0.02311	0.12114±0.0018	781±43	748±11	737±10	1.24	94
715-47	0.20612±0.00277	13.62334±0.22362	0.47942±0.00703	2875±22	2724±16	2525±31	1.23	86
715-48	0.06101±0.00186	0.84307±0.02589	0.10022±0.00167	640±67	621±14	616±10	0.98	96
715-49	0.10961±0.00242	4.47102±0.10171	0.29584±0.00442	1793±41	1726±19	1671±22	1.07	93
715-50	0.08651±0.00129	2.00083±0.03518	0.16777±0.00246	1350±29	1116±12	1000±14	0.37	65

续附表

样品号	同位素比值			年龄(Ma)			Th/U	谐和性
	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$		
SXGS1 26°48′04″N, 114°30′56″E								
SXGS1-01	0.07162±0.00099	1.67106±0.02744	0.16926±0.00243	975±29	998±10	1008±13	0.93	103
SXGS1-02	0.06942±0.00113	1.46129±0.02692	0.1527±0.00225	911±34	915±11	916±13	0.98	101
SXGS1-03	0.15907±0.00231	9.18046±0.15627	0.41867±0.00619	2446±25	2356±16	2254±28	0.42	91
SXGS1-04	0.06853±0.00161	0.99643±0.01866	0.10546±0.00149	885±50	702±9	646±9	0.11	63
SXGS1-05	0.13133±0.00183	6.58315±0.11053	0.36365±0.0053	2116±25	2057±15	1999±25	0.42	94
SXGS1-06	0.07264±0.00227	1.29012±0.04051	0.12884±0.00225	1004±65	841±18	781±13	1.63	71
SXGS1-07	0.09011±0.00138	3.14452±0.05626	0.25315±0.00375	1428±30	1444±14	1455±19	0.54	102
SXGS1-08	0.07943±0.00158	2.19301±0.0474	0.20027±0.00313	1183±40	1179±15	1177±17	1.55	99
SXGS1-09	0.1739±0.00276	11.82005±0.21853	0.49305±0.00742	2596±27	2590±17	2584±32	0.84	100
SXGS1-10	0.07915±0.00132	2.31922±0.04455	0.21254±0.00321	1176±34	1218±14	1242±17	0.43	105
SXGS1-11	0.07578±0.00109	1.91284±0.03309	0.18309±0.00274	1089±29	1086±12	1084±15	0.81	100
SXGS1-12	0.19411±0.00321	13.60255±0.24967	0.5083±0.0077	2777±28	2722±17	2649±33	0.98	95
SXGS1-13	0.07537±0.00099	1.94674±0.0325	0.18734±0.00283	1078±27	1097±11	1107±15	0.85	103
SXGS1-14	0.1398±0.00221	7.79142±0.1404	0.40423±0.00604	2225±28	2207±16	2188±28	1.14	98
SXGS1-15	0.08868±0.00148	3.01671±0.05796	0.24676±0.00385	1397±33	1412±15	1422±20	0.85	102
SXGS1-16	0.14916±0.00237	9.09502±0.16798	0.44228±0.00689	2336±28	2348±17	2361±31	0.54	101
SXGS1-17	0.07056±0.00103	1.5673±0.02778	0.16111±0.00244	945±31	957±11	963±14	0.54	102
SXGS1-18	0.06561±0.0013	1.20844±0.02609	0.13358±0.00208	794±43	804±12	808±12	0.56	102
SXGS1-19	0.1671±0.00259	11.42673±0.21117	0.49598±0.00769	2529±27	2559±17	2596±33	1.26	103
SXGS1-20	0.10468±0.00263	4.22665±0.10813	0.29289±0.0049	1709±47	1679±21	1656±24	1.56	97
SXGS1-21	0.07596±0.00208	1.94053±0.05424	0.18527±0.00316	1094±56	1095±19	1096±17	1.51	100
SXGS1-22	0.08527±0.00109	2.30803±0.03728	0.19629±0.0029	1322±25	1215±11	1155±16	0.24	86
SXGS1-23	0.06495±0.00117	1.11593±0.02257	0.12461±0.00193	773±39	761±11	757±11	4.37	98
SXGS1-24	0.06771±0.00098	1.33371±0.02311	0.14285±0.00213	860±31	860±10	861±12	1.14	100
SXGS1-25	0.07204±0.00106	1.62811±0.02842	0.16391±0.00243	987±31	981±11	978±13	0.91	99
SXGS1-26	0.10622±0.00232	4.31369±0.0987	0.29455±0.00483	1736±41	1696±19	1664±24	1.44	96
SXGS1-27	0.08927±0.00158	2.91338±0.05755	0.23668±0.00365	1410±35	1385±15	1369±19	1.03	97
SXGS1-28	0.0764±0.00122	1.84852±0.03433	0.17548±0.00268	1106±33	1063±12	1042±15	0.29	94
SXGS1-29	0.07308±0.00133	1.69106±0.03387	0.16782±0.00256	1016±38	1005±13	1000±14	1.39	98
SXGS1-30	0.06746±0.00116	1.27578±0.02439	0.13717±0.00204	852±37	835±11	829±12	0.81	97
SXGS1-31	0.07732±0.00101	1.94239±0.03083	0.18223±0.00259	1129±27	1096±11	1079±14	0.74	95
SXGS1-32	0.05961±0.00085	0.71529±0.01217	0.08704±0.00127	589±32	548±7	538±8	0.96	91
SXGS1-33	0.06504±0.00109	0.72815±0.0138	0.08121±0.0012	776±36	555±8	503±7	2.38	46
SXGS1-34	0.06715±0.00135	1.22869±0.0262	0.13272±0.00197	842±43	814±12	803±11	1.82	95
SXGS1-35	0.29952±0.00388	28.97943±0.46664	0.70184±0.01018	3468±21	3453±16	3428±39	0.58	99
SXGS1-36	0.10531±0.00157	4.31304±0.0756	0.29707±0.00441	1720±28	1696±14	1677±22	1.16	97
SXGS1-37	0.0762±0.00145	1.82964±0.038	0.17419±0.00266	1100±39	1056±14	1035±15	1.05	94
SXGS1-38	0.18948±0.00258	13.96984±0.23693	0.5348±0.00799	2738±23	2748±16	2762±34	0.66	101
SXGS1-39	0.06666±0.00106	1.16187±0.02149	0.12643±0.00189	827±34	783±10	767±11	1.23	92
SXGS1-40	0.10878±0.00195	4.80351±0.0969	0.32029±0.00506	1779±33	1786±17	1791±25	1.34	101
SXGS1-41	0.12259±0.00154	6.07194±0.09645	0.35927±0.00521	1994±23	1986±14	1979±25	1.16	99
SXGS1-42	0.16694±0.0028	11.10571±0.21098	0.48259±0.0077	2527±29	2532±18	2539±33	1.28	100
SXGS1-43	0.06152±0.00125	0.89099±0.01929	0.10506±0.00158	657±45	647±10	644±9	1.13	98
SXGS1-44	0.06726±0.00125	1.27556±0.02576	0.13758±0.00204	846±40	835±11	831±12	1.31	98
SXGS1-45	0.12544±0.00177	6.46516±0.11028	0.37382±0.00559	2035±26	2041±15	2047±26	2.27	101
SXGS1-46	0.16041±0.00238	9.21954±0.15861	0.41689±0.006	2460±26	2360±16	2246±27	1.18	90
SXGS1-47	0.09602±0.00169	3.34147±0.06456	0.25242±0.00373	1548±34	1491±15	1451±19	1.22	93
SXGS1-48	0.0656±0.00228	0.98402±0.03396	0.1088±0.00192	794±75	696±17	666±11	0.47	81
SXGS1-49	0.17632±0.00261	12.18148±0.21335	0.5011±0.00747	2619±25	2618±16	2619±32	1.30	100
SXGS1-50	0.09564±0.00201	3.13821±0.0699	0.23798±0.00377	1541±40	1442±17	1376±20	1.29	88

续附表

样品号	同位素比值			年龄(Ma)			Th/U	谐和性
	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$		
SXGS1-51	0.16837±0.0019	11.27299±0.14967	0.48554±0.00617	2542±10	2546±12	2551±27	1.34	100
SXGS1-52	0.076±0.00101	1.61426±0.0234	0.15414±0.00192	1095±13	976±9	924±11	0.48	81
SXGS1-53	0.07129±0.00129	1.51219±0.02789	0.15375±0.00194	966±19	935±11	922±11	0.11	95
SXGS1-54	0.07273±0.00114	1.54634±0.02558	0.1543±0.00196	1006±16	949±10	925±11	1.64	91
SXGS1-55	0.17812±0.00242	11.80386±0.17724	0.48084±0.00626	2635±11	2589±14	2531±27	0.96	96
SXGS1-56	0.06093±0.00287	0.91269±0.04244	0.10873±0.00175	637±72	658±23	665±10	0.64	104
SXGS1-57	0.09935±0.00128	3.90499±0.05736	0.28505±0.0037	1612±12	1615±12	1617±19	1.15	100
SXGS1-58	0.1589±0.00207	10.26149±0.14938	0.46847±0.00594	2444±11	2459±13	2477±26	1.02	101
SXGS1-59	0.07092±0.00104	1.58227±0.02533	0.16184±0.00208	955±15	963±10	967±12	1.76	101
SXGS1-60	0.16195±0.00253	10.72325±0.18166	0.48082±0.00628	2476±13	2499±16	2531±27	0.30	102
SXGS1-61	0.17898±0.00255	11.96534±0.18953	0.48489±0.00636	2643±12	2602±15	2549±28	0.33	96
SXGS1-62	0.18042±0.00408	12.18933±0.27827	0.49008±0.00798	2657±18	2619±21	2571±35	0.77	97
SXGS1-63	0.16096±0.00214	10.28077±0.15362	0.46331±0.00602	2466±11	2460±14	2454±27	1.14	100
SXGS1-64	0.06967±0.00104	1.45637±0.02372	0.15164±0.00198	919±15	913±10	910±11	0.90	99
SXGS1-65	0.16789±0.00235	10.37347±0.16033	0.44825±0.0058	2537±12	2469±14	2387±26	0.92	94
SXGS1-66	0.09553±0.00164	3.02852±0.05487	0.2301±0.00301	1539±16	1415±14	1335±16	1.74	85
SXGS1-67	0.09359±0.00131	2.23809±0.03483	0.17351±0.00229	1500±13	1193±11	1031±13	1.47	55
SXGS1-68	0.08271±0.00168	2.42565±0.05065	0.21303±0.00299	1262±21	1250±15	1245±16	0.65	99
SXGS1-69	0.11961±0.00171	6.17068±0.09721	0.37428±0.005	1950±13	2000±14	2050±23	1.67	105
SXGS1-70	0.06794±0.00187	1.36565±0.03778	0.14582±0.00213	867±34	874±16	877±12	1.06	101
SXGS1-71	0.06704±0.00126	1.36438±0.02658	0.14763±0.00201	839±20	874±11	888±11	0.98	106
SXGS1-72	0.15345±0.00232	9.86434±0.16093	0.46641±0.00623	2385±13	2422±15	2468±27	1.00	103
SXGS1-73	0.08283±0.0026	2.28671±0.07082	0.2003±0.00316	1265±36	1208±22	1177±17	1.15	93
SXGS1-74	0.08362±0.0014	2.47007±0.04348	0.21435±0.00288	1284±16	1263±13	1252±15	0.49	97
SXGS1-75	0.10158±0.00184	4.15757±0.07811	0.29692±0.00404	1653±17	1666±15	1676±20	1.74	101
SXGS2　26°33′72″N, 114°10′19″E								
SXGS2-01	0.07357±0.00199	1.82818±0.05081	0.18018±0.00304	1030±56	1056±18	1068±17	0.40	104
SXGS2-02	0.22053±0.00605	17.45554±0.48583	0.57394±0.01077	2985±45	2960±27	2924±44	1.42	98
SXGS2-03	0.0576±0.00159	0.62477±0.0177	0.07865±0.00131	515±62	493±11	488±8	0.77	94
SXGS2-04	0.07021±0.00259	1.26429±0.04628	0.13058±0.00247	935±78	830±21	791±14	0.86	82
SXGS2-05	0.07591±0.00238	1.89802±0.06008	0.18133±0.00322	1093±64	1080±21	1074±18	1.04	98
SXGS2-06	0.16293±0.00533	10.621±0.34718	0.47276±0.00928	2486±56	2491±30	2496±41	1.21	100
SXGS2-07	0.16027±0.00471	9.7694±0.29333	0.44206±0.00768	2459±51	2413±28	2360±34	0.88	96
SXGS2-08	0.12282±0.00382	5.56538±0.17578	0.32863±0.0058	1998±57	1911±27	1832±28	0.16	91
SXGS2-09	0.08797±0.00332	2.92126±0.10956	0.24085±0.00469	1382±74	1387±28	1391±24	0.43	101
SXGS2-10	0.12561±0.00292	0.87077±0.02188	0.05027±0.00085	2037±42	636±12	316±5	1.58	-445
SXGS2-11	0.06476±0.00145	1.08838±0.02608	0.12188±0.00197	767±48	748±13	741±11	0.72	96
SXGS2-12	0.07333±0.00272	0.81367±0.02969	0.08047±0.00147	1023±77	605±17	499±9	1.89	–5
SXGS2-13	0.09263±0.00301	1.37638±0.04403	0.10779±0.00185	1480±63	879±19	660±11	0.26	–24
SXGS2-14	0.05797±0.0017	0.53339±0.01572	0.06675±0.00108	529±66	434±10	417±7	0.63	73
SXGS2-15	0.11487±0.00366	3.1977±0.10062	0.20193±0.00341	1878±59	1457±24	1186±18	0.73	42
SXGS2-16	0.06123±0.00137	0.8747±0.02081	0.10361±0.00163	647±49	638±11	636±10	0.45	98
SXGS2-17	0.08615±0.00211	2.64681±0.06702	0.22283±0.00353	1342±48	1314±19	1297±19	0.45	97
SXGS2-18	0.07517±0.00201	1.72869±0.04765	0.16679±0.00282	1073±55	1019±18	994±16	0.74	92
SXGS2-19	0.15503±0.00733	8.60593±0.38998	0.40248±0.00864	2402±82	2297±41	2180±40	3.39	90
SXGS2-20	0.07185±0.00299	0.88362±0.03659	0.08919±0.00188	982±87	643±20	551±11	1.55	22
SXGS2-21	0.1227±0.00173	5.88509±0.09091	0.34789±0.00457	1996±26	1959±13	1925±22	1.09	96
SXGS2-22	0.06499±0.00109	0.64345±0.01175	0.07182±0.00101	774±36	504±7	447±6	1.48	27
SXGS2-23	0.06792±0.00105	1.30266±0.02188	0.13912±0.00185	866±33	847±10	840±10	0.18	97
SXGS2-24	0.05585±0.00081	0.53596±0.00871	0.06961±0.00093	446±33	436±6	434±6	0.13	97
SXGS2-25	0.161±0.002	10.38701±0.15209	0.46793±0.00623	2466±21	2470±14	2474±27	1.28	100

续附表

样品号	同位素比值			年龄(Ma)			Th/U	谐和性
	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$		
SXGS2-26	0.09134±0.00144	2.53148±0.04458	0.20103±0.00287	1454±31	1281±13	1181±15	0.99	77
SXGS2-27	0.04826±0.00614	0.43609±0.05496	0.06554±0.00114	112±258	367±39	409±7	0.99	173
SXGS2-28	0.05815±0.00105	0.71229±0.01396	0.08885±0.00129	535±40	546±8	549±8	0.52	103
SXGS2-29	0.06667±0.00175	1.18256±0.03095	0.12865±0.00194	827±56	793±14	780±11	1.57	94
SXGS2-30	0.05098±0.01433	1.22279±0.34246	0.17396±0.00399	240±500	811±156	1034±22	1.98	177
SXGS2-31	0.05684±0.00102	0.53741±0.01029	0.06859±0.00095	485±41	437±7	428±6	1.15	87
SXGS2-32	0.10614±0.00244	4.08494±0.07244	0.27914±0.00408	1734±43	1651±14	1587±21	0.02	91
SXGS2-33	0.10025±0.00167	3.761±0.06903	0.27213±0.00391	1629±32	1584±15	1552±20	0.93	95
SXGS2-34	0.06513±0.00163	1.0053±0.02549	0.11196±0.00171	779±54	706±13	684±10	1.00	86
SXGS2-35	0.10074±0.0019	4.05509±0.08194	0.29195±0.00426	1638±36	1645±16	1651±21	0.74	101
SXGS2-36	0.05579±0.00109	0.57361±0.01217	0.07457±0.00112	444±44	460±8	464±7	0.94	104
SXGS2-37	0.18545±0.00327	13.13782±0.2493	0.51386±0.00717	2702±30	2690±18	2673±31	0.34	99
SXGS2-38	0.0605±0.00166	0.81897±0.02269	0.09819±0.00154	622±61	607±13	604±9	1.86	97
SXGS2-39	0.13498±0.00277	7.25851±0.15458	0.39003±0.00561	2164±37	2144±19	2123±26	0.82	98
SXGS2-40	0.09575±0.00203	3.34493±0.07482	0.25337±0.00377	1543±41	1492±17	1456±19	0.61	94
SXGS2-41	0.07247±0.00151	1.62771±0.03609	0.16291±0.00251	999±43	981±14	973±14	3.61	97
SXGS2-42	0.14608±0.00228	8.78986±0.15713	0.4364±0.00634	2301±27	2316±16	2335±28	0.80	101
SXGS2-43	0.07605±0.00121	1.72862±0.03096	0.16486±0.00236	1096±33	1019±12	984±13	0.71	89
SXGS2-44	0.05804±0.00101	0.52222±0.00989	0.06526±0.00092	531±39	427±7	408±6	1.80	70
SXGS2-45	0.07525±0.00145	1.35191±0.02732	0.1303±0.00183	1075±40	868±12	790±10	0.55	64
SXGS2-46	0.06598±0.00216	1.1802±0.03817	0.12972±0.00218	806±70	791±18	786±12	1.58	97
SXGS2-47	0.07885±0.00176	2.09676±0.0481	0.19288±0.00288	1168±45	1148±16	1137±16	0.76	97
SXGS2-48	0.06027±0.00158	0.59409±0.01589	0.07148±0.00113	613±58	473±10	445±7	0.87	62
SXGS2-49	0.05596±0.00115	0.54554±0.01208	0.07071±0.00108	451±47	442±8	440±7	0.07	98
SXGS2-50	0.06622±0.00201	0.61464±0.01855	0.06734±0.00108	813±65	486±12	420±7	0.97	6
SXGS2-51	0.0704±0.00091	1.51541±0.02134	0.15614±0.00191	940±13	937±9	935±11	0.71	99
SXGS2-52	0.13374±0.00264	6.77638±0.13968	0.36733±0.00541	2148±17	2083±18	2017±26	1.29	94
SXGS2-53	0.05953±0.00082	0.76996±0.01149	0.09381±0.00117	587±15	580±7	578±7	1.55	98
SXGS2-54	0.07522±0.00152	1.82452±0.0401	0.17591±0.00278	1074±21	1054±14	1045±15	0.46	97
SXGS2-55	0.11395±0.00165	3.51056±0.05288	0.22348±0.00269	1863±12	1530±12	1300±14	0.54	57
SXGS2-56	0.08023±0.00111	2.13942±0.03151	0.1934±0.00236	1203±13	1162±10	1140±13	0.92	94
SXGS2-57	0.11362±0.00209	1.80547±0.03324	0.11528±0.00144	1858±17	1047±12	703±8	2.74	–64
SXGS2-58	0.15503±0.00262	9.39614±0.16483	0.43954±0.00576	2402±14	2377±16	2349±26	3.84	98
SXGS2-59	0.11415±0.00146	4.15998±0.06052	0.2643±0.00341	1867±12	1666±12	1512±17	0.85	77
SXGS2-60	0.07421±0.00105	1.22183±0.01847	0.11941±0.00146	1047±14	811±8	727±8	1.33	56
SXGS2-61	0.07245±0.00158	1.59729±0.03498	0.15992±0.00212	999±24	969±14	956±12	1.78	96
SXGS2-62	0.10417±0.00158	3.77229±0.06062	0.26264±0.0033	1700±14	1587±13	1503±17	0.51	87
SXGS2-63	0.0681±0.00093	1.27015±0.01867	0.13525±0.00168	872±14	832±8	818±10	0.94	93
SXGS2-64	0.06585±0.001	1.15458±0.01862	0.12715±0.00161	802±16	779±9	772±9	1.76	96
SXGS2-65	0.06283±0.00202	0.87945±0.02759	0.10145±0.00158	702±41	641±15	623±9	1.63	87
SXGS2-66	0.06654±0.00222	1.06465±0.03459	0.11606±0.00176	823±43	736±17	708±10	3.35	84
SXGS2-67	0.07368±0.00104	1.67797±0.02537	0.16514±0.00206	1033±14	1000±10	985±11	0.43	95
SXGS2-68	0.10151±0.00127	1.90378±0.02683	0.13599±0.00172	1652±12	1082±9	822±10	1.26	–1
SXGS2-69	0.12076±0.00203	4.98217±0.08642	0.29915±0.00386	1967±15	1816±15	1687±19	0.90	83
SXGS2-70	0.08731±0.00125	1.41931±0.02227	0.11788±0.00153	1367±14	897±9	718±9	1.46	10
SXGS2-71	0.06092±0.00104	0.83231±0.01498	0.09907±0.00133	636±18	615±8	609±8	2.16	96
SXGS2-72	0.06675±0.0013	1.13217±0.02273	0.12297±0.00172	830±21	769±11	748±10	1.40	89
SXGS2-73	0.06928±0.00107	1.22781±0.01975	0.12851±0.0016	907±15	813±9	779±9	1.06	84
SXGS2-74	0.10622±0.0017	4.39812±0.07423	0.30031±0.00392	1736±14	1712±14	1693±19	1.44	97
SXGS2-75	0.076±0.0013	1.78436±0.03129	0.17025±0.00217	1095±17	1040±11	1013±12	0.08	92

续附表

样品号	同位素比值			年龄(Ma)			Th/U	谐和性
	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$		
SXGS3　26°32′93″N, 114°10′57E								
SXGS3-01	0.16015±0.0025	10.27125±0.18345	0.46517±0.00695	2457±27	2460±17	2462±31	0.98	100
SXGS3-02	0.14513±0.00383	6.92727±0.183	0.3463±0.00532	2289±46	2102±23	1917±25	0.18	81
SXGS3-03	0.07442±0.00215	1.81161±0.05312	0.17656±0.00295	1053±60	1050±19	1048±16	1.05	100
SXGS3-04	0.08114±0.00421	1.76884±0.08829	0.15812±0.00352	1225±105	1034±32	946±20	1.33	71
SXGS3-05	0.06654±0.00131	1.23612±0.02595	0.13474±0.00198	823±42	817±12	815±11	0.26	99
SXGS3-06	0.16003±0.00296	9.91075±0.19792	0.44921±0.00665	2456±32	2427±18	2392±30	0.77	97
SXGS3-07	0.20887±0.00353	16.30217±0.30914	0.56614±0.00833	2897±28	2895±18	2892±34	0.95	100
SXGS3-08	0.14946±0.00291	8.95509±0.18798	0.43461±0.00666	2340±34	2333±19	2326±30	0.41	99
SXGS3-09	0.07617±0.00167	1.95589±0.0454	0.18625±0.0029	1100±45	1100±16	1101±16	0.90	100
SXGS3-10	0.07565±0.00178	1.85437±0.04532	0.17784±0.00273	1086±48	1065±16	1055±15	1.22	97
SXGS3-11	0.11928±0.01776	5.70579±0.8354	0.34692±0.00943	1946±282	1932±126	1920±45	1.40	99
SXGS3-12	0.1618±0.00252	10.61185±0.19454	0.47572±0.00721	2475±27	2490±17	2509±31	0.42	101
SXGS3-13	0.0642±0.00298	1.1819±0.05435	0.13346±0.0029	748±101	792±25	808±16	3.32	107
SXGS3-14	0.06536±0.00147	1.18596±0.02798	0.13162±0.00203	786±48	794±13	797±12	0.17	101
SXGS3-15	0.11393±0.00279	4.65949±0.11684	0.29668±0.00468	1863±45	1760±21	1675±23	0.41	89
SXGS3-16	0.07414±0.00178	1.63029±0.04162	0.15948±0.00268	1045±50	982±16	954±15	1.28	90
SXGS3-17	0.16071±0.00335	10.41382±0.23282	0.47±0.0076	2463±36	2472±21	2484±33	2.20	101
SXGS3-18	0.07104±0.00258	1.64845±0.05966	0.16831±0.00319	959±76	989±23	1003±18	1.05	104
SXGS3-19	0.07484±0.00165	1.86354±0.04404	0.1806±0.00288	1064±45	1068±16	1070±16	0.33	101
SXGS3-20	0.09089±0.00135	3.18611±0.05659	0.25425±0.00381	1444±29	1454±14	1460±20	0.33	101
SXGS3-21	0.06707±0.00146	1.29311±0.02975	0.13984±0.00217	840±46	843±13	844±12	0.33	100
SXGS3-22	0.06907±0.00166	1.47922±0.03762	0.15535±0.00261	901±51	922±15	931±15	1.34	103
SXGS3-23	0.07573±0.00135	1.92692±0.03896	0.18458±0.00289	1088±37	1090±14	1092±16	0.60	100
SXGS3-24	0.07665±0.00161	1.93285±0.04363	0.18293±0.00291	1112±43	1093±15	1083±16	0.27	97
SXGS3-25	0.0735±0.00202	1.74722±0.04899	0.17242±0.00291	1028±57	1026±18	1025±16	0.42	100
SXGS3-26	0.06603±0.00209	1.22206±0.03889	0.13425±0.00234	807±68	811±18	812±13	1.41	101
SXGS3-27	0.10881±0.00264	4.74673±0.11927	0.31644±0.00519	1780±45	1776±21	1772±25	0.53	100
SXGS3-28	0.07414±0.0018	1.83544±0.04662	0.17958±0.00294	1045±50	1058±17	1065±16	0.45	102
SXGS3-29	0.06789±0.0016	1.41043±0.0353	0.15074±0.0025	865±50	893±15	905±14	0.08	104
SXGS3-30	0.1774±0.00304	12.40041±0.2397	0.50707±0.00792	2629±29	2635±18	2644±34	0.82	101
SXGS3-31	0.18565±0.00308	13.44165±0.25544	0.52522±0.00804	2704±28	2711±18	2721±34	0.63	101
SXGS3-32	0.16544±0.00305	9.98933±0.20211	0.438±0.00673	2512±32	2434±19	2342±30	1.07	93
SXGS3-33	0.09087±0.00191	3.24648±0.07395	0.25916±0.00425	1444±41	1468±18	1486±22	0.51	103
SXGS3-34	0.17762±0.00399	12.20881±0.28959	0.49854±0.00806	2631±38	2621±22	2608±35	0.45	99
SXGS3-35	0.19487±0.00356	14.74808±0.30158	0.54897±0.00855	2784±31	2799±19	2821±36	0.15	101
SXGS3-36	0.07382±0.00236	1.68283±0.05378	0.16537±0.00293	1037±66	1002±20	987±16	0.79	95
SXGS3-37	0.05792±0.00138	0.68444±0.01719	0.08572±0.00139	527±53	529±10	530±8	1.00	101
SXGS3-38	0.0722±0.0016	1.69765±0.04039	0.17056±0.00276	992±46	1008±15	1015±15	0.26	102
SXGS3-39	0.07559±0.00199	1.9443±0.05312	0.18657±0.00316	1084±54	1096±18	1103±17	0.80	102
SXGS3-40	0.06694±0.00131	1.19939±0.02613	0.12997±0.00207	836±42	800±12	788±12	1.29	94
SXGS3-41	0.10943±0.00195	4.84754±0.09753	0.32135±0.00496	1790±33	1793±17	1796±24	0.18	100
SXGS3-42	0.06717±0.0023	1.3083±0.04452	0.1413±0.00254	843±73	849±20	852±14	1.08	101
SXGS3-43	0.06582±0.00192	1.21773±0.03651	0.13422±0.0023	801±63	809±17	812±13	1.29	101
SXGS3-44	0.17038±0.00467	11.04836±0.3082	0.47043±0.00775	2561±47	2527±26	2485±34	0.60	97
SXGS3-45	0.0697±0.00154	1.55131±0.0372	0.16148±0.00264	920±46	951±15	965±15	0.76	105
SXGS3-46	0.16064±0.00519	9.78312±0.31716	0.44195±0.00776	2462±56	2415±30	2359±35	0.22	96
SXGS3-47	0.06775±0.00302	1.19229±0.05269	0.12767±0.00263	861±95	797±24	775±15	1.81	89
SXGS3-48	0.06984±0.00335	1.25069±0.05895	0.12995±0.00288	924±101	824±27	788±16	1.05	83
SXGS3-49	0.16198±0.0038	10.625±0.26706	0.47582±0.00779	2476±41	2491±23	2509±34	0.98	101
SXGS3-50	0.06622±0.00233	1.23565±0.04369	0.13535±0.00248	813±75	817±20	818±14	2.65	101

续附表

样品号	同位素比值			年龄(Ma)			Th/U	谐和性
	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$		
SXGS3-51	0.07694±0.00129	1.97724±0.03463	0.18629±0.00243	1120±17	1108±12	1101±13	1.42	98
SXGS3-52	0.07571±0.00165	1.29926±0.02856	0.12438±0.00171	1087±23	845±13	756±10	2.21	56
SXGS3-53	0.18075±0.00348	11.99487±0.23436	0.48103±0.00642	2660±16	2604±18	2532±28	1.02	95
SXGS3-54	0.15231±0.00211	8.45407±0.12883	0.40257±0.00514	2372±12	2281±14	2181±24	0.53	91
SXGS3-55	0.20807±0.00312	16.03109±0.25834	0.55858±0.00724	2891±12	2879±15	2861±30	0.57	99
SXGS3-56	0.1626±0.00236	10.31357±0.16204	0.4598±0.00583	2483±12	2463±15	2439±26	0.87	98
SXGS3-57	0.07176±0.00126	1.59518±0.02923	0.1611±0.00212	979±18	968±11	963±12	1.81	98
SXGS3-58	0.09419±0.00185	3.30722±0.06668	0.2546±0.00341	1512±19	1483±16	1462±18	0.62	97
SXGS3-59	0.07025±0.00165	1.48365±0.03528	0.15306±0.00217	936±27	924±14	918±12	1.06	98
SXGS3-60	0.06981±0.00137	1.37754±0.02784	0.14314±0.00195	923±21	879±12	862±11	0.77	93
SXGS3-61	0.24505±0.00493	20.84394±0.43406	0.61679±0.00869	3153±17	3131±20	3097±35	1.45	98
SXGS3-62	0.16237±0.00447	10.23573±0.29195	0.45735±0.00716	2480±28	2456±26	2428±32	2.15	98
SXGS3-63	0.07723±0.00109	1.99378±0.03087	0.18718±0.00239	1127±14	1113±10	1106±13	1.02	98
SXGS3-64	0.16505±0.00224	10.18888±0.15268	0.44766±0.00568	2508±11	2452±14	2385±25	1.28	95
SXGS3-65	0.05995±0.00275	0.78139±0.03528	0.0945±0.00158	602±69	586±20	582±9	5.13	97
SXGS3-66	0.07201±0.00314	1.41245±0.06012	0.14218±0.00253	986±58	894±25	857±14	1.00	85
SXGS3-67	0.0674±0.00113	1.28523±0.02266	0.1383±0.0018	850±17	839±10	835±10	2.27	98
SXGS3-68	0.06516±0.00171	1.09319±0.02852	0.1217±0.00178	780±31	750±14	740±10	1.61	95
SXGS3-69	0.07807±0.00153	2.09949±0.04233	0.19505±0.00266	1149±20	1149±14	1149±14	1.97	100
SXGS3-70	0.07295±0.00119	1.40264±0.02415	0.13944±0.00181	1013±16	890±10	841±10	0.29	80
SXGS3-71	0.15267±0.00616	9.40937±0.37125	0.4474±0.00872	2376±41	2379±36	2384±39	2.75	100
SXGS3-72	0.0737±0.00114	1.72337±0.02868	0.16961±0.00221	1033±16	1017±11	1010±12	1.41	98
SXGS3-73	0.24112±0.0052	20.40262±0.44008	0.61372±0.00926	3127±17	3111±21	3085±37	2.01	99
SXGS3-74	0.07289±0.00141	1.65408±0.03269	0.16463±0.00219	1011±20	991±13	982±12	0.96	97
SXGS3-75	0.16808±0.00358	10.73032±0.22849	0.46307±0.00641	2539±18	2500±20	2453±28	1.21	96
SXGS4 25°31′87″N, 114°47′95″E								
SXGS4-01	0.07516±0.002	1.71044±0.04701	0.16505±0.00275	1073±55	1012±18	985±15	1.38	91
SXGS4-02	0.05862±0.00188	0.55994±0.01822	0.06927±0.00117	553±72	451±12	432±7	1.51	72
SXGS4-03	0.07816±0.00169	1.73106±0.03986	0.16062±0.00249	1151±44	1020±15	960±14	1.17	80
SXGS4-04	0.09949±0.00167	3.91302±0.07535	0.28528±0.0043	1615±32	1616±16	1618±22	1.14	100
SXGS4-05	0.08619±0.00144	2.67353±0.05178	0.22497±0.00345	1342±33	1321±14	1308±18	1.82	97
SXGS4-06	0.16177±0.00293	10.38766±0.21002	0.46569±0.00725	2474±31	2470±19	2465±32	1.75	100
SXGS4-07	0.05707±0.00146	0.56953±0.01532	0.07238±0.00118	494±58	458±10	450±7	0.75	90
SXGS4-08	0.06665±0.00242	1.25087±0.04535	0.13611±0.00246	827±78	824±20	823±14	2.09	100
SXGS4-09	0.06497±0.00172	0.80871±0.02223	0.09029±0.00151	773±57	602±12	557±9	1.13	61
SXGS4-10	0.14284±0.0031	8.24122±0.19127	0.41847±0.00662	2262±38	2258±21	2254±30	1.15	100
SXGS4-11	0.05772±0.00176	0.55363±0.01719	0.06956±0.00118	519±69	447±11	434±7	1.54	80
SXGS4-12	0.0612±0.00126	0.87502±0.01946	0.10371±0.00163	646±45	638±11	636±10	1.04	98
SXGS4-13	0.07158±0.00124	1.67542±0.03328	0.16977±0.00266	974±36	999±13	1011±15	2.10	104
SXGS4-14	0.07186±0.00128	1.58829±0.03201	0.16032±0.00249	982±37	966±13	959±14	0.58	98
SXGS4-15	0.16068±0.00259	10.24666±0.19339	0.46255±0.00721	2463±28	2457±17	2451±32	0.86	100
SXGS4-16	0.15496±0.00336	7.21215±0.16624	0.33759±0.00583	2401±38	2138±21	1875±28	0.48	72
SXGS4-17	0.175±0.00394	11.41177±0.26988	0.47299±0.00801	2606±38	2557±22	2497±35	0.27	96
SXGS4-18	0.1627±0.00292	10.43205±0.21253	0.46507±0.00735	2484±31	2474±19	2462±32	1.92	99
SXGS4-19	0.16781±0.00556	10.86802±0.35668	0.46977±0.00981	2536±57	2512±31	2483±43	4.09	98
SXGS4-20	0.05487±0.00222	0.50742±0.02037	0.06708±0.00125	407±93	417±14	419±8	1.56	103
SXGS4-21	0.07883±0.00151	2.10576±0.04455	0.19376±0.00306	1168±39	1151±15	1142±17	1.05	98
SXGS4-22	0.07178±0.00171	1.58704±0.04012	0.16038±0.00269	980±50	965±16	959±15	3.24	98
SXGS4-23	0.22576±0.00428	16.6133±0.34421	0.53369±0.00831	3022±31	2913±20	2757±35	0.90	90
SXGS4-24	0.07218±0.00155	1.59581±0.03708	0.16036±0.00262	991±45	969±15	959±15	1.01	97
SXGS4-25	0.05539±0.00145	0.54669±0.01505	0.0716±0.00121	428±60	443±10	446±7	0.58	104

续附表

样品号	同位素比值			年龄(Ma)			Th/U	谐和性
	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$		
SXGS4-26	0.0814±0.00163	1.65338±0.03623	0.14732±0.00231	1231±40	991±14	886±13	0.66	61
SXGS4-27	0.06905±0.00122	1.43555±0.02885	0.15079±0.00236	900±37	904±12	905±13	0.53	101
SXGS4-28	0.16091±0.00301	10.37404±0.21808	0.4677±0.00752	2465±32	2469±19	2473±33	1.38	100
SXGS4-29	0.12192±0.00277	5.90924±0.14136	0.35148±0.00579	1985±41	1963±21	1942±28	0.55	98
SXGS4-30	0.11917±0.00253	5.86711±0.13539	0.35716±0.00597	1944±39	1956±20	1969±28	1.76	101
SXGS4-31	0.10589±0.00128	4.39512±0.06555	0.30106±0.00415	1730±23	1711±12	1697±21	1.30	98
SXGS4-32	0.06587±0.00118	1.18921±0.02321	0.13096±0.00191	802±38	796±11	793±11	0.75	99
SXGS4-33	0.0574±0.00123	0.56749±0.01281	0.07171±0.00107	507±48	456±8	446±6	0.69	86
SXGS4-34	0.11662±0.00192	5.37829±0.09726	0.33449±0.00488	1905±30	1881±15	1860±24	1.39	98
SXGS4-35	0.09959±0.00162	3.85938±0.06978	0.28109±0.00411	1616±31	1605±15	1597±21	3.24	99
SXGS4-36	0.08159±0.00162	2.23894±0.04653	0.19904±0.00291	1236±40	1193±15	1170±16	1.00	94
SXGS4-37	0.06232±0.00119	0.79968±0.01631	0.09307±0.00134	685±42	597±9	574±8	2.00	81
SXGS4-38	0.16527±0.00226	10.68269±0.17274	0.46884±0.00662	2510±24	2496±15	2478±29	1.67	99
SXGS4-39	0.07387±0.00108	1.69291±0.02983	0.16622±0.00248	1038±30	1006±11	991±14	0.13	95
SXGS4-40	0.13714±0.00184	7.60661±0.12186	0.4023±0.00567	2191±24	2186±14	2180±26	0.64	99
SXGS4-41	0.1658±0.00194	10.78542±0.15899	0.47184±0.00656	2516±20	2505±14	2492±29	0.81	99
SXGS4-42	0.1855±0.00218	13.14968±0.19433	0.51416±0.00715	2703±20	2690±14	2674±30	0.93	99
SXGS4-43	0.07017±0.00124	1.43023±0.02714	0.14783±0.0021	933±37	902±11	889±12	1.89	95
SXGS4-44	0.10414±0.00131	4.24353±0.0649	0.29555±0.00411	1699±24	1682±13	1669±20	1.00	98
SXGS4-45	0.0666±0.00145	0.6326±0.01455	0.06889±0.00105	825±46	498±9	429±6	1.11	8
SXGS4-46	0.19178±0.00252	13.88037±0.21804	0.52498±0.00742	2757±22	2742±15	2720±31	0.84	99
SXGS4-47	0.06085±0.00108	0.58528±0.01136	0.06977±0.00101	634±39	468±7	435±6	0.89	54
SXGS4-48	0.04616±0.00472	0.40807±0.04116	0.06412±0.00106	6±210	347±30	401±6	0.98	199
SXGS4-49	0.08841±0.01139	2.96702±0.37698	0.24341±0.00519	1391±260	1399±96	1404±27	2.33	101
SXGS4-50	0.16068±0.00274	9.72364±0.18506	0.43892±0.00656	2463±29	2409±18	2346±29	2.09	95
SXGS4-51	0.06398±0.00145	1.00737±0.02314	0.1142±0.00164	741±26	708±12	697±9	0.58	94
SXGS4-52	0.15688±0.00212	10.27555±0.15643	0.47513±0.00648	2422±12	2460±14	2506±28	0.91	103
SXGS4-53	0.13306±0.00181	7.69585±0.11823	0.41953±0.00573	2139±12	2196±14	2258±26	0.35	105
SXGS4-54	0.07016±0.00548	1.44895±0.11113	0.1498±0.00336	933±121	909±46	900±19	1.78	96
SXGS4-55	0.0613±0.00108	0.84867±0.01575	0.10042±0.00135	650±19	624±9	617±8	1.04	95
SXGS4-56	0.06363±0.00131	1.13399±0.02403	0.12925±0.00182	729±23	770±11	784±10	1.72	107
SXGS4-57	0.05983±0.00108	0.83783±0.01591	0.10156±0.0014	597±20	618±9	624±8	0.90	104
SXGS4-58	0.10212±0.00237	4.77797±0.11157	0.33939±0.00547	1663±21	1781±20	1884±26	1.74	112
SXGS4-59	0.06079±0.00142	0.77244±0.0183	0.09217±0.00132	632±27	581±10	568±8	2.03	89
SXGS4-60	0.06742±0.00152	1.65666±0.03811	0.17826±0.00275	851±24	992±15	1057±15	0.66	119
SXGS4-61	0.06547±0.00124	1.48172±0.02945	0.16415±0.00239	789±20	923±12	980±13	0.46	119
SXGS4-62	0.09016±0.00223	1.28213±0.03169	0.10315±0.00154	1429±25	838±14	633±9	2.00	–26
SXGS4-63	0.06465±0.00093	1.31438±0.02113	0.14748±0.00201	763±15	852±9	887±11	0.59	114
SXGS4-64	0.06136±0.00221	0.83091±0.02964	0.09822±0.00149	652±50	614±16	604±9	1.99	92
SXGS4-65	0.09516±0.00304	3.48523±0.10872	0.26571±0.00453	1531±34	1524±25	1519±23	2.37	99
SXGS4-66	0.09939±0.00183	4.1155±0.07911	0.30036±0.00426	1613±17	1657±16	1693±21	2.63	105
SXGS4-67	0.07354±0.00133	1.61128±0.03014	0.15893±0.00212	1029±18	975±12	951±12	0.48	92
SXGS4-68	0.17795±0.00252	12.87056±0.20105	0.52462±0.00694	2634±12	2670±15	2719±29	0.45	103
SXGS4-69	0.06809±0.00122	1.41742±0.02663	0.15102±0.00206	871±19	896±11	907±12	0.43	104
SXGS4-70	0.07987±0.00128	2.46479±0.04256	0.22387±0.00306	1194±16	1262±12	1302±16	1.09	108
SXGS4-71	0.05317±0.00218	0.55414±0.02173	0.07589±0.00136	336±57	448±14	472±8	0.67	129
SXGS4-72	0.096±0.00162	3.69361±0.06585	0.27909±0.00375	1548±16	1570±14	1587±19	1.51	102
SXGS4-73	0.17095±0.0031	11.19547±0.20806	0.47506±0.00629	2567±15	2540±17	2506±27	1.07	98
SXGS4-74	0.30935±0.00466	31.8064±0.51555	0.74579±0.00978	3518±11	3544±16	3592±36	0.40	102
SXGS4-75	0.20758±0.00397	10.47155±0.20227	0.36598±0.00481	2887±16	2477±18	2010±23	0.79	56