

青藏高原北羌塘昌都地块发现~4.0 Ga 碎屑锆石

何世平^{①②}, 李荣社^①, 王超^①, 张宏飞^②, 计文化^①, 于浦生^①, 辜平阳^①, 时超^①

① 西安地质矿产研究所, 西安 710054;

② 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074

E-mail: xakeyi@163.com

2010-08-10 收稿, 2010-12-03 接受

中国地质调查局资助项目(1212010610102)

摘要 采用 LA-ICP-MS 和 MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 测年, 在北羌塘昌都地块宁多岩群变质碎屑岩中发现 3981 ± 9 Ma 碎屑锆石. 这是迄今在羌塘地区获得的最古老年龄记录, 也是我国境内发现的年龄大于 3.9 Ga 的第 3 颗锆石. ~4.0 Ga 碎屑锆石的发现为寻找冥古宙地壳物质提供了新的线索. 100 个测试点还获得 3.51~3.13 Ga 碎屑锆石年龄和 ~2440, ~1532, ~982 及 ~618 Ma 年龄峰值. ~982 和 ~618 Ma 分别与 Rodinia 超大陆形成和泛非运动相对应, 暗示其与 Gondwana 超大陆的亲缘关系. ~618 Ma 限定了宁多岩群石榴石二云石英片岩原岩的沉积时代下限. ~982 Ma 的碎屑锆石总体具有负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 1933~2553 Ma 的两阶段 Hf 模式年龄, 说明宁多岩群物源区存在古元古代从亏损地幔分离进入地壳的重大地质事件; 2854~3505 Ma 的锆石也具有负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 3784~4316 Ma 的两阶段 Hf 模式年龄, 表明宁多岩群物源区残留有少量更古老(冥古代)的地壳物质. 该研究为探讨羌塘基底与冈底斯和喜马拉雅基底之间的关系以及限定 Gondwana 大陆北界提供了新的资料.

关键词

昌都地块
宁多岩群
冥古宙
碎屑锆石
LA-ICP-MS
Hf 同位素

地球的形成和早期演化一直是地球科学研究探索的重要内容之一, 涉及最早的大陆地壳是何时形成的、性质如何, 地球演化的早期是否存在壳幔物质循环等一系列重要的基础科学问题^[1]. 由于后期复杂多样的地质作用改造, 致使地球上形成于冥古宙 (4.56~3.85 Ga)^[2,3] 的岩石分布十分局限. 迄今为止, ≥ 3.8 Ga 的地壳岩石仅在格陵兰^[4,5]、加拿大^[6,7]、中国鞍山^[8-10] 和东南极^[11-13] 地区被发现. 加拿大 Wopmay 造山带中 Acasta 片麻岩的形成时代为 ~4016 Ma^[14], 是地球上已发现的最古老岩石. 尽管地球早期形成的岩石保存有限, 但保存在年轻地质体中的古老锆石残留要比实际古老地壳岩石丰富得多^[15]. 国外地球科学家经过长期不懈的探索, 在德国巴伐利亚东北^[16]、美国怀俄明州北部^[17]、西澳 Yilgarn 克拉通^[18]、巴西圣弗朗西斯科克拉通^[19]、尼泊尔西部高喜马拉雅地区^[20] 及哈萨克斯坦北部^[21] 等地发现了

≥ 3.8 Ga 的碎屑锆石, 无疑对进一步寻找地球形成早期地壳岩石和研究地球早期演化提供了良好的线索. 其中, 西澳 Yilgarn 克拉通北部 Jack Hills 是目前发现大量 > 4.0 Ga 碎屑锆石的地区, ~4.4 Ga 碎屑锆石为目前已知的最古老地球物质^[18].

近年来, 我国在寻找和研究最古老岩石和锆石方面也取得了重要进展. 自 20 世纪末鞍山地区 3.8 Ga 的 TTG 岩石被发现^[8] 以来, 国内相继发现了多处 ≥ 3.8 Ga 的碎屑锆石, 包括河北迁西县^[1,22,23]、西藏普兰县^[24,25]、湖北宜昌^[26]、甘肃两当县^[27] 及广东东南部平乐-北江^[28]. 其中, 西藏普兰县喜马拉雅造山带和甘肃两当县北秦岭造山带西段 4.1 Ga 锆石的发现是我国目前发现的最老地质年龄记录, 为寻找和研究地球上最古老的物质做出了重大贡献.

最近通过 LA-ICP-MS 方法, 在青藏高原北羌塘的昌都地块宁多岩群变质碎屑岩中获得 3981 ± 9 Ma

的碎屑锆石年龄数据,这是目前在青藏高原腹地羌塘地区发现的最古老的地壳年龄记录,也是我国境内继西藏和秦岭之后发现的第三老的锆石年龄,这一发现对研究地球早期地壳的形成演化和进一步研究羌塘地区基底性质具有重要意义。

1 区域地质背景

研究区位于青藏高原腹地北羌塘的昌都地块,西金乌兰-金沙江缝合带和班公湖-怒江缝合带之间,青海省玉树县之西(图 1)。昌都地块呈向北东突出的

狭长带状沿巴颜喀拉造山带南侧展布。由于大面积中生界的覆盖和北西西-北西向断裂错动,昌都地块的前寒武纪基底岩系呈断块状零星分布,主要由宁多岩群和雄松岩群组成。《西南区区域地层》对该区前寒武纪地层层序进行了修订,认为雄松岩群与宁多岩群属同物异名^[29],将西藏芒康县-四川巴塘县原定的“雄松岩群”归为宁多岩群。因此,昌都地块的基底仅由宁多岩群构成,在区域上该岩群主要出露于青海治多县多彩乡、玉树县隆宝镇、小苏莽,以及西藏与四川交界贡觉县-芒康县西部、江达县-巴塘县

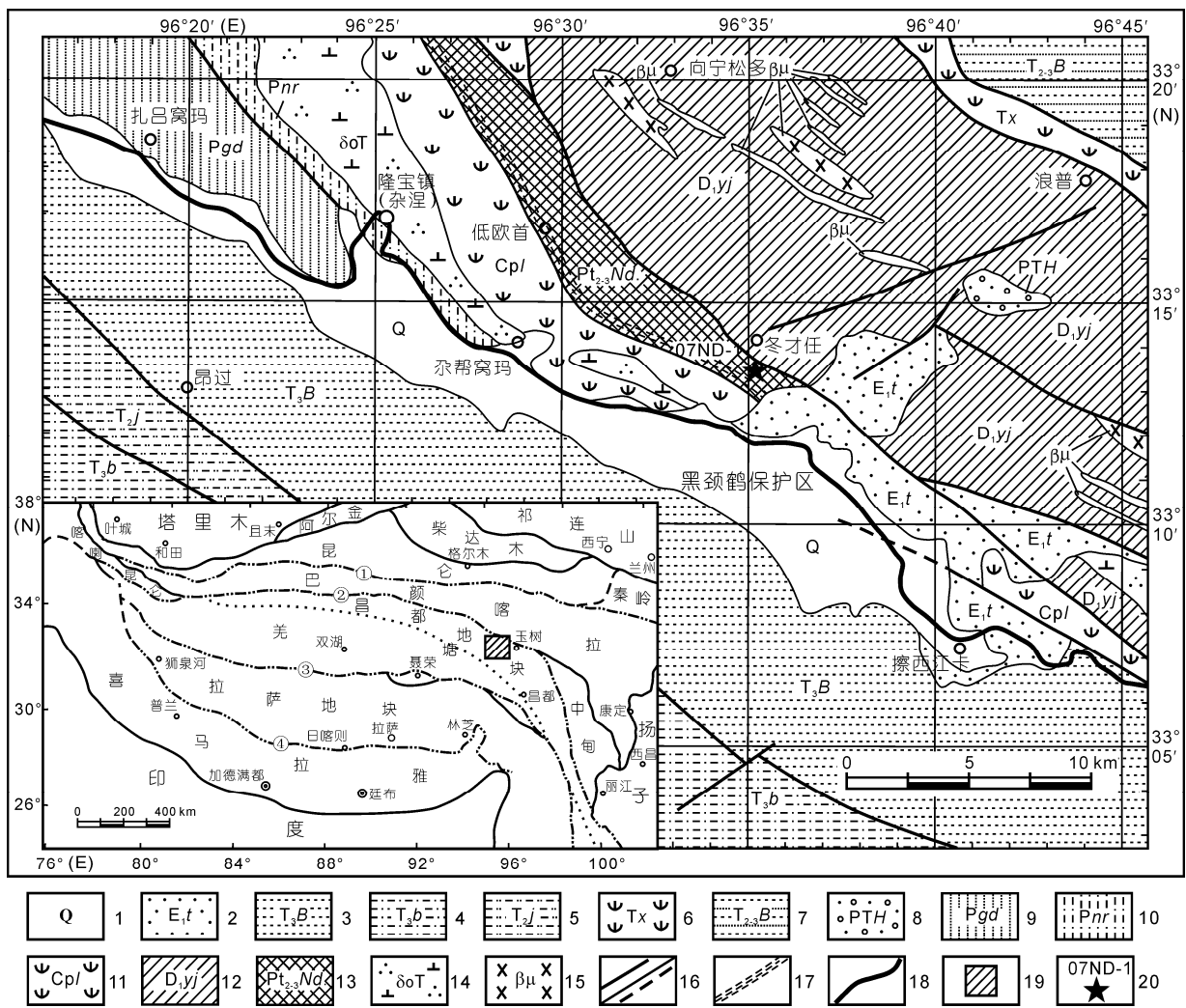


图 1 北羌塘昌都地块青海省玉树县隆宝镇一带地质简图

据 1:25 万玉树幅区调资料修改。1, 第四系; 2, 古近纪沱沱河组; 3, 晚三叠世巴塘群; 4, 晚三叠世波里拉组; 5, 中三叠世结隆组; 6, 三叠纪歇武蛇绿混杂岩; 7, 中晚三叠世巴颜喀拉山群; 8, 二叠-三叠纪汉台山群; 9, 二叠纪尕斯库勒组; 10, 二叠纪诺日巴日保组; 11, 石炭-二叠纪隆宝蛇绿混杂岩; 12, 早泥盆世依吉组; 13, 中新元古代宁多岩群; 14, 三叠纪石英闪长岩; 15, 辉长辉绿岩; 16, 断裂/推测断裂; 17, 韧性剪切带; 18, 公路; 19, 研究区范围; 20, 采样位置及编号。① 康西瓦-木孜塔格-玛沁-勉县-略阳缝合带; ② 西金乌兰-金沙江缝合带; ③ 班公湖-怒江缝合带; ④ 雅鲁藏布江缝合带

东部的金沙江一带。

本文研究的重点为青海省玉树县隆宝镇(杂涅)一带的宁多岩群。研究区内的宁多岩群呈北西向狭长带状分布于歇武蛇绿混杂岩带和隆宝蛇绿混杂岩带之间,主要为一套高绿片岩-低角闪岩相变质的黑云斜长片麻岩、石榴石二云石英片岩、石英岩、浅粒岩夹斜长角闪片岩、绿泥角闪片岩及大理岩,片理产状: $170^{\circ} \angle 62^{\circ}$ 。原岩为一套成熟度较高的沉积碎屑岩-中基性火山岩-碳酸盐岩建造。关于宁多岩群的时代存在较大分歧,原青海省区测队最早依据区域对比将这组地层划为上古生界;1:20 万区调^[30,31]于夏日多一带测得宁多岩群中二云母斜长片麻岩 U-Pb 年龄为 2200 ± 140 Ma,于长可青一带宁多岩群黑云母斜长片麻岩中获得 1870 ± 280 Ma 的重结晶锆石 U-Pb 年龄,并于大、小苏莽地区分别获得侵入该套副片麻岩中片麻状黑云母花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 1780 ± 150 和 1680 ± 309 Ma,将宁多岩群的时代归为古-中元古代;1:25 万治多幅在宁多岩群黑云斜长片麻岩中获得单颗粒 U-Pb 锆石年龄为 709 ± 66 Ma^[32],认为反映该套地层晋宁期变质时代;同样 1:25 万曲柔尔卡幅在该套地层中获 $835 \sim 915$ Ma 锆石 U-Pb 表面年龄^[33],认为岩石片理形成于晋宁期。根据上述同位素年代学数据,结合岩石组合、变质变形、无层无序特点并与区域地层对比等,将宁多岩群时代暂置于中元古代-新元古代^[34]。

研究区发育歇武和隆宝两条北西向延伸的蛇绿混杂岩带,均为 1:25 万玉树县幅^[35]从原通天河蛇绿混杂岩中解体出来的,在区域上相当于西金乌兰-金沙江缝合带的组成部分。宁多岩群经后期的构造作用,被强烈肢解、破碎、片理化,局部与隆宝蛇绿混杂岩混杂在一起,甚至以岩块形式夹持于混杂岩带中。区内以北西向断裂为主,成为不同时代地层的分界线,并有大量沿北西向展布的辉绿辉长岩脉侵入早泥盆世依吉组浅变质碎屑岩夹中基-中酸性火山岩或火山碎屑岩中。

2 同位素测年

2.1 样品采集

用于碎屑锆石同位素测年的样品采自青海省玉树县西北约 45 km 近南北向沟谷西侧(地理坐标: $33^{\circ}14'27.5''N$, $96^{\circ}35'24''E$, 4502 m)。采集对象为宁多岩群石榴石二云石英片岩(样号: 07ND-1), 样品重量

约 28 kg。石榴石二云石英片岩呈浅灰白色,主体呈鳞片粒状变晶结构,片状构造,变形揉皱发育,云母类具有膝折现象。矿物成分主要为黑云母($24\% \pm$)、白云母($20\% \pm$)和石英($45\% \pm$),少量石榴石($10\% \pm$)及锆石($<1\%$)。其原岩为碎屑沉积岩。

2.2 分析测试条件

锆石单矿物挑选在国土资源部河北省地质矿产局廊坊实验室完成,将岩石样品(07ND-1)破碎至 20~30 目,经常规浮选和磁选方法分选后,得到约 180 粒锆石。在双目显微镜下挑选出形态较为完整、无裂痕、无包裹体的锆石约 120 粒作为测定对象。在实验室将分选出的锆石晶体粘在环氧树脂胶上固制成靶,把粘有锆石的一面抛磨至约一半,使锆石内部充分暴露,然后进行锆石显微(反射光和透射光)照相、阴极发光(CL)显微图像研究及 LA-ICP-MS 和 MC-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 同位素组成测定。

锆石的阴极发光(CL)图像在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。采用美国 Gatan 公司生产的阴极荧光光谱仪(型号 Mono CL3+)进行锆石内部结构显微照相。

锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素组成分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。其中,07ND-1-01~07ND-1-60 样点 U-Pb 同位素由激光剥蚀电感耦合等离子质谱(LA-ICP-MS)仪测试,激光束剥蚀孔径为 $30 \mu\text{m}$; 07ND-1-1b~07ND-1-68b 样点 U-Pb 同位素和 Lu-Hf 同位素由激光剥蚀电感耦合多接收等离子质谱(MC-ICP-MS)仪测试,激光束剥蚀孔径为 $44 \mu\text{m}$ 。样品的同位素比值及元素含量计算采用 GLITTER (Ver4.0, Macquarie University)程序,并按照 Andersen 的方法^[36]进行同位素比值校正,以扣除普通铅的影响。放射成因铅的含量根据 Stacey 所给出的地壳平均铅同位素组成进行了普通铅校正。年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot(Ver3.0)^[37]程序完成。详细仪器设备、分析步骤和数据处理参见文献[38~40]。

2.3 锆石特征

宁多岩群石榴石二云石英片岩(样号: 07ND-1)中获得的锆石绝大多数为浑圆状(部分残缺锆石可能属于碎样时机械破损),大小悬殊($60 \sim 180 \mu\text{m}$),颜色多样(浅褐色、浅烟灰色、浅黄色、浅玫瑰色、无色透明),表现出多源区碎屑锆石特征。

锆石 CL 图像显示, 该岩石中的锆石多呈浑圆状、内部发育环带结构(图 2), 表现出岩浆源区碎屑锆石特征; 少数锆石(14b, 26b, 27b, 68b)的环带结构宽缓模糊, 可能为后期蚀变所致. 个别锆石具有斑杂状结构(2b, 42b, 66b), 部分具有内核(13, 50b, 44b). 年龄 > 900 Ma 的部分锆石外围有暗色加大边(5, 25, 26, 47, 50, 44b, 66b), 表明其经历了较强构造-热事件

的改造, 具有后期生长特征. 49 号锆石呈浑圆状(图 2(a)), 发育核、幔、边结构, 核、幔部分具环带结构, 表现出多期生长的特征.

2.4 锆石 U-Pb 测年结果

宁多岩群石榴石二云石英片岩碎屑锆石 U-Pb 年龄测试点共 128 个, 经普通铅校正后, 剔除 ^{204}Pb 过

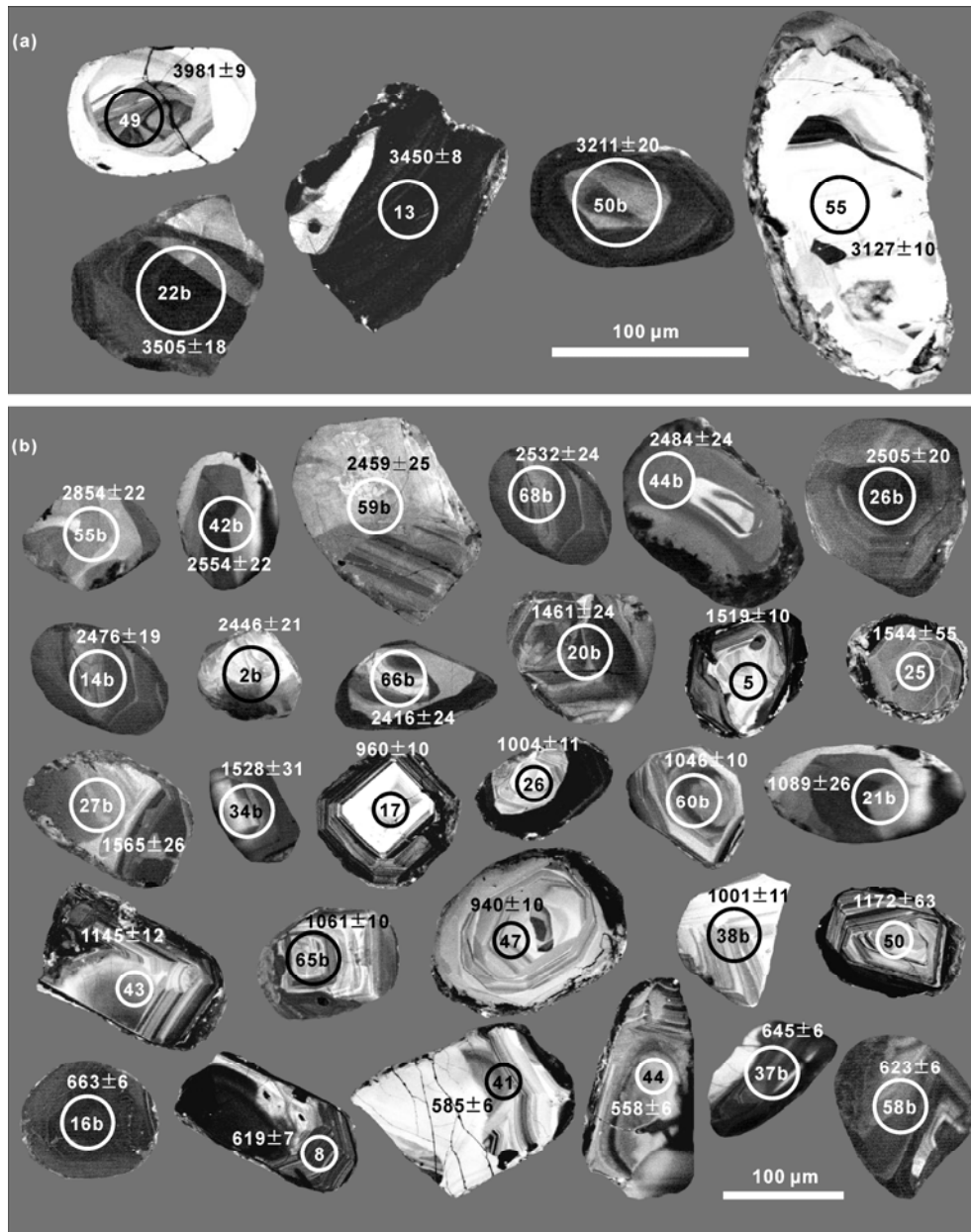


图 2 宁多岩群石榴石二云石英片岩年龄 > 3100 Ma (a) 锆石和年龄 < 3000 Ma 代表性锆石 (b) CL 图像
 锆石中的圆圈为同位素测年激光剥蚀的示意范围, 相应的编号为测点号. 年龄单位为 Ma, 年龄大于和小于 1000 Ma 时分别使用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

高及谐和度较差(谐和度 < 90 和 > 110)的 28 个点(4, 7, 28, 30, 35, 39, 40, 46, 48, 53, 57, 59, 3b, 6b, 13b, 17b, 24b, 28b, 29b, 32b, 33b, 39b, 41b, 46b, 51b, 53b, 54b, 67b), 有效测试点共 100 个(表 S1).

宁多岩群石榴石二云石英片岩(07ND-1)存在少量古老碎屑锆石. 其中, 年龄最老的碎屑锆石(49 样点)具核-幔-边结构, 数据采自具环带结构的核部(图 2(a)), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $3981 \pm 9 \text{ Ma}$; 在 U-Pb 谐和图(图 3(a))中, 该样点位于谐和线下方且靠近谐和线(谐和度为 94%), 有少量放射成因铅丢失. 此外, 岩石还包含 4 颗 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $(3505 \pm 18) \sim (3127 \pm 10) \text{ Ma}$ (22b, 13, 50b, 55 样点)的古老碎屑锆石.

锆石 U-Pb 谐和图(图 3(a))和锆石谐和年龄频率分布图(图 3(b))表明, 主要有 4 个年龄集中区. 主集中区谐和年龄介于 1200~850 Ma 之间, 大多数测点位于谐和线上或其附近, 为数据的主体, 峰值为 ~982 Ma, 这些锆石多为浑圆状, 内部发育振荡环带结构(图 2(b)), Th/U 比值(总体在 0.31~4.67 之间)较高, 表明它们来自经历过 Grenville 期构造-岩浆事件的源区. 另一个集中区 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 700~530 Ma 之间, 峰值年龄 ~618 Ma, 锆石多为浑圆状-棱角状, 内部发育环带结构(图 2(b)), Th/U 比值(0.38~5.92)较高; 此外, 还有 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 分别为 2600~2300 和 1700~1400 Ma 的两个年龄次级集中区, 峰值年龄为 ~2440 和 ~1532 Ma, 这些锆石也为浑圆状, 多发育宽缓的环带结构(图 2(b)), Th/U 比值较高, 分别为介于 0.33~1.23 和 0.23~2.50 之间; 表明这些碎屑锆石来自经历过 ~618, ~2440 和 ~1532 Ma 构造-岩浆事件的源区.

2.5 锆石 Hf 同位素组成

宁多岩群石榴石二云石英片岩碎屑锆石 Lu-Hf 同位素测试点共 68 个, 因部分锆石的 Hf 同位素含量偏低, 导致测试数据致信度下降, 剔除数据质量较差的 18 个点(3b, 5b, 6b, 13b, 17b, 23b, 24b, 28b, 29b, 32b, 33b, 39b, 41b, 46b, 51b, 53b, 54b, 67b), 有效测试点共 50 个(表 1). 所有锆石均具有低的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值(绝大多数小于 0.002), 显示锆石在形成以后具有较低的放射成因 Hf 的积累. 碎屑锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值明显分为 4 组(图 4(a)).

(1) 对于 ~2440 Ma 的锆石, 其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值较低, 变化范围为 0.280456~0.281269, 其对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值(变化范围为 -3.2~-25.6), 其两阶段模式年龄 T_{DM2} 值变化范围为 3039~4584 Ma, 均大于相对应的锆石形成年龄; (2) ~1532 Ma 的锆石, 其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值也较低, 变化范围为 0.281313~0.281826, 其对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值除一个点为正值外(0.7), 其余为负值(变化范围为 -0.4~-18.4), 对应的两阶段模式年龄 T_{DM2} 值变化范围为 2296~3384 Ma, 均大于相对应的锆石形成年龄; (3) Grenville 期的锆石, 其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值总体较高, 变化范围更大(0.281406~0.282441), 其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 -27.9~9.8, 对应的两阶段模式年龄 T_{DM2} 值为 1234~3533 Ma; (4) ~618 Ma 的锆石, 其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值较低, 变化范围为 0.281637~0.282023, 其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值(-13.0~-32.4), 其 T_{DM2} 值变化于 2373~3592 Ma.

此外, 少量 2854~3505 Ma 锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值

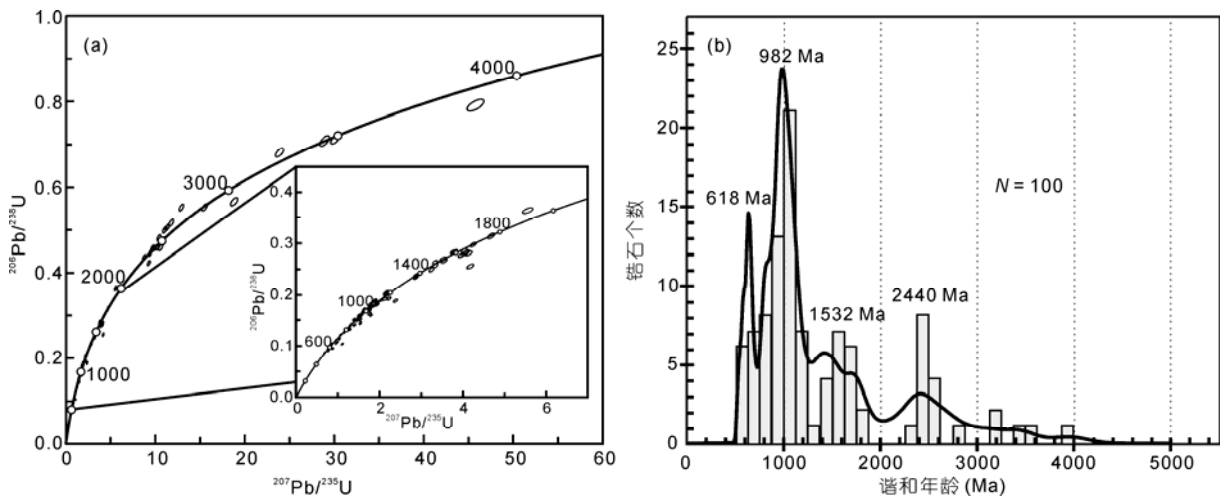


图 3 宁多岩群石榴二云石英片岩(07ND-1)碎屑锆石 U-Pb 谐和图(a)和锆石年龄频率分布图(b)

表1 北羌塘昌都地块宁多岩群石榴石二云石英片岩(07ND-1)碎屑锆石 MC-ICP-MS Lu-Hf 同位素组成

样点编号	年龄(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	T_{DM1}	T_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
07ND-1-1b	955	0.03044	0.00116	0.281967	0.000022	-28.5	-8.1	0.8	1816	2320	-0.96
07ND-1-2b	2446	0.01324	0.00052	0.281091	0.000019	-59.4	-5.5	0.7	2972	3294	-0.98
07ND-1-4b	1145	0.03500	0.00132	0.281815	0.000029	-33.8	-9.5	1.0	2036	2551	-0.96
07ND-1-7b	1016	0.02246	0.00083	0.281936	0.000021	-29.6	-7.7	0.7	1843	2339	-0.97
07ND-1-8b	983	0.02092	0.00078	0.281938	0.000019	-29.5	-8.3	0.7	1838	2352	-0.98
07ND-1-9b	1660	0.02991	0.00116	0.281589	0.000023	-41.8	-6.2	0.8	2340	2737	-0.96
07ND-1-10b	1552	0.03797	0.00139	0.281826	0.000021	-33.5	-0.4	0.7	2024	2296	-0.96
07ND-1-11b	1197	0.01957	0.00074	0.281915	0.000022	-30.3	-4.4	0.8	1868	2272	-0.98
07ND-1-12b	1143	0.03628	0.00143	0.281089	0.000028	-59.5	-35.4	1.0	3046	4137	-0.96
07ND-1-14b	2476	0.01407	0.00050	0.280988	0.000022	-63.1	-8.5	0.8	3109	3496	-0.98
07ND-1-15b	803	0.03197	0.00134	0.282441	0.000036	-11.7	5.3	1.3	1158	1363	-0.96
07ND-1-16b	663	0.01068	0.00040	0.280922	0.000020	-65.4	-51.1	0.7	3189	4746	-0.99
07ND-1-18b	1079	0.01905	0.00068	0.281831	0.000031	-33.3	-9.9	1.1	1980	2525	-0.98
07ND-1-19b	942	0.01405	0.00057	0.281406	0.000021	-48.3	-27.9	0.7	2552	3533	-0.98
07ND-1-20b	1461	0.01946	0.00079	0.281544	0.000032	-43.4	-11.8	1.1	2378	2929	-0.98
07ND-1-21b	1089	0.05388	0.00226	0.282343	0.000023	-15.2	7.3	0.8	1329	1458	-0.93
07ND-1-22b	3505	0.01401	0.00053	0.280561	0.000022	-78.2	-0.1	0.8	3678	3784	-0.98
07ND-1-25b	1043	0.06348	0.00232	0.282218	0.000027	-19.6	1.9	1.0	1512	1764	-0.93
07ND-1-26b	2505	0.00446	0.00013	0.280959	0.000021	-64.1	-8.2	0.7	3117	3502	-1.00
07ND-1-27b	1565	0.01349	0.00051	0.281738	0.000024	-36.6	-2.3	0.9	2098	2424	-0.98
07ND-1-30b	1689	0.05765	0.00242	0.281693	0.000033	-38.2	-3.3	1.2	2271	2581	-0.93
07ND-1-31b	1053	0.01302	0.00060	0.281824	0.000023	-33.5	-10.7	0.8	1986	2553	-0.98
07ND-1-34b	1528	0.01774	0.00067	0.281313	0.000022	-51.6	-18.4	0.8	2684	3384	-0.98
07ND-1-35b	1569	0.01893	0.00071	0.281499	0.000023	-45.0	-10.9	0.8	2435	2958	-0.98
07ND-1-36b	909	0.01090	0.00042	0.281865	0.000023	-32.1	-12.3	0.8	1920	2543	-0.99
07ND-1-37b	645	0.02274	0.00088	0.281466	0.000024	-46.2	-32.4	0.8	2491	3592	-0.97
07ND-1-38b	1001	0.01733	0.00069	0.282435	0.000030	-11.9	9.8	1.1	1146	1234	-0.98
07ND-1-40b	1084	0.03725	0.00137	0.281957	0.000024	-28.8	-5.8	0.9	1840	2276	-0.96
07ND-1-42b	2554	0.01301	0.00049	0.280456	0.000031	-81.9	-25.6	1.1	3813	4584	-0.99
07ND-1-43b	2421	0.01125	0.00042	0.280770	0.000029	-70.8	-17.3	1.0	3391	3989	-0.99
07ND-1-44b	2484	0.01408	0.00055	0.281132	0.000024	-58.0	-3.3	0.9	2920	3186	-0.98
07ND-1-45b	798	0.01974	0.00072	0.281941	0.000028	-29.4	-12.2	1.0	1831	2454	-0.98
07ND-1-47b	642	0.00649	0.00029	0.281637	0.000023	-40.1	-26.2	0.8	2223	3205	-0.99
07ND-1-48b	1021	0.01761	0.00066	0.281947	0.000027	-29.2	-7.1	1.0	1820	2304	-0.98
07ND-1-49b	1705	0.00687	0.00027	0.281727	0.000026	-37.0	0.7	0.9	2100	2346	-0.99
07ND-1-50b	3211	0.01212	0.00055	0.280588	0.000023	-77.2	-6.0	0.8	3644	3909	-0.98
07ND-1-52b	1202	0.02107	0.00079	0.282040	0.000031	-25.9	0.1	1.1	1698	1995	-0.98
07ND-1-55b	2854	0.01844	0.00073	0.280509	0.000018	-80.0	-17.4	0.6	3766	4316	-0.98
07ND-1-56b	955	0.03341	0.00130	0.282118	0.000030	-23.1	-2.9	1.1	1611	1991	-0.96
07ND-1-57b	850	0.04760	0.00180	0.281622	0.000025	-40.7	-23.0	0.9	2333	3160	-0.95
07ND-1-58b	623	0.01298	0.00047	0.282023	0.000030	-26.5	-13.0	1.1	1707	2373	-0.99
07ND-1-59b	2459	0.00762	0.00030	0.280568	0.000026	-77.9	-23.5	0.9	3647	4386	-0.99
07ND-1-60b	1046	0.03652	0.00138	0.282071	0.000025	-24.8	-2.6	0.9	1681	2046	-0.96
07ND-1-61b	851	0.01719	0.00076	0.282163	0.000024	-21.5	-3.2	0.9	1527	1933	-0.98
07ND-1-62b	2297	0.02387	0.00093	0.281269	0.000025	-53.2	-3.2	0.9	2762	3039	-0.97
07ND-1-63b	1811	0.04550	0.00179	0.281470	0.000023	-46.0	-7.9	0.8	2546	2955	-0.95
07ND-1-64b	2511	0.01253	0.00057	0.280938	0.000023	-64.9	-9.6	0.8	3181	3589	-0.98
07ND-1-65b	1061	0.02518	0.00093	0.282243	0.000024	-18.7	4.1	0.9	1422	1636	-0.97
07ND-1-66b	2416	0.00762	0.00030	0.280975	0.000021	-63.5	-10.0	0.7	3109	3540	-0.99
07ND-1-68b	2532	0.01384	0.00054	0.280839	0.000020	-68.4	-12.6	0.7	3311	3786	-0.98

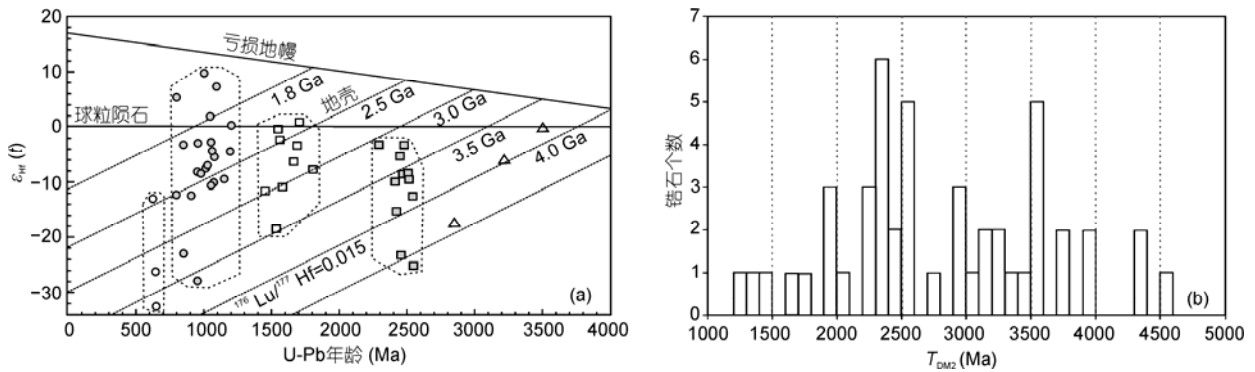


图 4 石榴二云石英片岩碎屑锆石 Hf 同位素特征(a)和 Hf 两阶段模式年龄频率分布直方图(b)

较低(0.280509~0.280588), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为负值(-0.1~-17.4), 对应的 T_{DM2} 值为 3784~4316 Ma.

3 讨论

锆石微区 U-Pb 同位素测年结果表明, 北羌塘昌都地块青海省玉树县隆宝镇一带宁多岩群石榴石二云石英片岩的碎屑锆石分布于 2600~2300, 1700~1400, 1200~850 和 700~530 Ma 4 个年龄集中区, 对应的峰值年龄依次为~2440, ~1532, ~982 和~618 Ma. 主峰值年龄为~982 Ma, 相当于 Rodinia 超大陆汇聚过程的 Grenville 造山运动时限(1190~980 Ma)^[41-43]; 次峰值年龄~618 Ma 为样品最新蚀源区年龄, 与泛非运动时限(主要集中于 600~550 Ma)^[44,45]接近, 表明宁多岩群石榴石二云石英片岩的沉积物部分来自经历过泛非运动的源区. 这些年轻的锆石也限定了该地层沉积时代的下限, 即其最早可能形成于新元古代晚期. ~2440 和~1532 Ma 次峰值年龄对应的锆石呈浑圆状、内部发育宽缓的环带、Th/U 比值较高, 表明该地层形成时还接收了少量这两个年龄区间源区的物质, ~2440 和~1532 Ma 可能代表源区的两期构造-岩浆事件.

此外, 测年样品中还存在少量>3100 Ma 的古老碎屑锆石, 其中最老的锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 3981 ± 9 Ma, 其余还有 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 3505 ± 18 , 3450 ± 8 , 3211 ± 20 和 3127 ± 10 Ma 的古老碎屑锆石. 3981 ± 9 Ma 碎屑锆石年龄数据是目前青藏高原腹地羌塘地区发现的最古老的地壳年龄记录, 也是我国境内继西藏和秦岭之后发现的第三老的锆石年龄, 在世界范围内 ≥ 3.8 Ga 的地质体和年龄纪录也较为少见. 表明北羌塘存在少量古老地壳物质的残留, 与同时

获得的(3505±18)~(3127±10) Ma 碎屑锆石一起, 构成了研究北羌塘地壳早期(冥古宙-太古宙)形成与演化珍贵的物质基础, 也为今后寻找地球初始阶段的地壳岩石提供了新的依据.

锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析已经成为研究大陆地壳生长和再造事件的重要手段^[46,47]. 锆石 Hf 模式年龄代表锆石母岩浆从亏损地幔提取出来的时间, 即地壳生长的时间. 但是由于大多数锆石的母岩浆不是直接由地幔分异出来, 这时二阶段模式年龄更接近新生地壳生长时间. 宁多岩群的锆石 Hf 同位素分析表明, ~982 Ma 锆石总体具有负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 1933~2553 Ma 的两阶段 Hf 模式年龄, 说明宁多岩群物源区可能存在古元古代新生地壳. 少量 2854~3505 Ma 的锆石也具有负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 3784~4316 Ma 的模式年龄, 表明宁多岩群物源区尚有更古老(冥古代)的地壳物质, 这与存在 3981 ± 9 Ma 碎屑锆石相吻合, 暗示北羌塘昌都地块可能存在地球形成初始阶段的地壳物质. 目前, 很难推测 3981 ± 9 Ma 锆石的来源, 结合两阶段 Hf 模式年龄为 3784~4316 Ma 碎屑锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为负值, 或许暗示 3981 ± 9 Ma 碎屑锆石的物源区为冥古代从亏损地幔分离进入地壳的 TTG 岩系.

目前, 关于羌塘地区是否存在前寒武纪基底仍有较大争议. 多数研究者认为羌塘基底由元古代变质岩系构成并具双层结构^[48-51]; 王国芝等人^[52]认为在羌塘地区可能存在太古代陆核. 李才^[53]结合多次野外调查和研究对羌塘地区古老基底提出质疑, 在原划前寒武纪基底岩系中获得一组 318~384 Ma 的锆石 U-Pb 及 Rb-Sr 同位素年龄数据, 认为羌塘中部的浅变质岩系主体时代为晚石炭世. 但是, 最近完成的

1:25 万区调在羌塘地区东部获得了一批晋宁期年龄信息;近年来,在羌塘腹地确立了奥陶纪蛇绿岩,堆晶辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄为 438 ± 11 Ma^[54]. 本文获得宁多岩群最新蚀源区年龄为 ~ 618 Ma, 可作为该地层沉积时代的下限, 结合区域地质特征其可能形成于新元古代晚期或早古生代.

值得一提的是, 青藏高原南部喜马拉雅地区相继在普兰县和尼泊尔西部分别获得 4.1~4.0 Ga 的碎屑锆石, 喜马拉雅-冈底斯一直被认为属于东 Gondwana 大陆, 并发现大量泛非运动年龄信息^[55-57]; Yu 等人^[58] 对华夏地块新元古代晚期变质沉积岩的碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素进行了研究, 获得大量 Grenville 期(~ 1.0 Ga)和新太古代(~ 2.5 Ga)年龄, 少量始太古代(~ 3.8 Ga)、古太古代-中太古代(3.3~3.0 Ga)、中元古代(1.7~1.4 Ga)及泛非期(0.70~0.54 Ga)年龄, 认为其源区主要为北 Gondwana 大陆的东印度-东南极, 新元古代 Rodinia 大陆裂解、Gondwana 大陆汇聚期间华南地块南部可能与印度和东南极毗邻. 北羌塘昌都地块宁多岩群除了获得 3.98 Ga 的碎屑锆石外, 也获得了大量 Grenville 期(~ 980 Ma)和泛非期(~ 618 Ma)碎屑锆石年龄, 推测昌都地块可能与北 Gondwana 超大陆存在亲缘关系. 因而, 探讨研究羌塘基底与冈底斯和喜马拉雅基底之间的关系, 进而限定 Gondwana 大陆的北界, 是今后值得进一步深入探究的重要科学问题.

致谢 衷心感谢吴元保教授、万渝生研究员、李才教授、王洪亮博士、第五春荣博士对论文提出的建设性意见. 在数据测试过程中得到柳小明教授、袁洪林教授、查显锋、弓虎军、戴梦宁、李平、武鹏、唐卓和朱涛的有益帮助, 在此一并表示感谢.

参考文献

- 1 吴福元, 杨进辉, 柳小明, 等. 冀东 3.8 Ga 锆石 Hf 同位素特征与华北克拉通早期地壳时代. 科学通报, 2005, 50: 1996-2003
- 2 Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, et al. A new Geologic Time Scale, with special reference to Precambrian and Neogene. Episodes, 2004, 27: 83-100
- 3 陆松年, 王惠初, 李怀坤. 解读国际地层委员会 2004 年前寒武纪地层表及 2004~2008 年参考方案. 地层学杂志, 2005, 25: 180-187
- 4 Kinny P D. 3820 Ma zircons from a tonalitic Amitsoq gneiss in the Godthab district of southern West Greenland. Earth Planet Sci Lett, 1986, 79: 337-347
- 5 Nutman A P, Mojzsis S J, Friend C R L. Recognition of ≥ 3850 Ma water-lain sediments in West Greenland and their significance for the early Archaean Earth. Geochim Cosmochim Acta, 1997, 61: 2475-2484
- 6 Bowring S A, Housh T B, Isachsen C E. The Acasta gneisses: Remnant of Earth's early crust. In: Newsom H E, Jones J H, eds. Origin of the Earth. New York: Oxford University Press, 1990. 319-343
- 7 Iizuka T, Horie K, Komiya T, et al. 4.2 Ga zircon xenocryst in an Acasta gneiss from northwestern Canada: Evidence for early continental crust. Geology, 2006, 34: 245-248

4 结论

(1) 利用 LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 同位素测年技术, 于北羌塘昌都地块宁多岩群石榴石二云石英片岩中获得 3981 ± 9 Ma 的碎屑锆石年龄, 同时获得 $(3505 \pm 18) \sim (3127 \pm 10)$ Ma 的碎屑锆石年龄, 说明北羌塘昌都地块存在非常古老的地壳残留.

(2) 宁多岩群的碎屑锆石年龄主要集中于 2600~2300, 1700~1400, 1200~850 和 700~530 Ma 4 个组, 峰值年龄分别为 ~ 2440 , ~ 1532 , ~ 982 和 ~ 618 Ma. 其中, 主峰值年龄 ~ 982 Ma 与 Rodinia 超大陆聚合的 Grenville 造山运动时限相吻合; 次峰值年龄 ~ 618 Ma 与 Gondwana 超大陆聚合的泛非运动时限大致相当, 暗示昌都地块与 Gondwana 超大陆有着亲缘关系, 这为探讨羌塘基底与冈底斯和喜马拉雅基底之间的关系, 进而限定 Gondwana 大陆的北界提供了新资料.

(3) ~ 618 Ma 为宁多岩群中最年轻的碎屑物质, 由此限定了该地层沉积时代的下限是新元古代晚期到早古生代.

(4) 宁多岩群 ~ 982 Ma 碎屑锆石总体具有负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 两阶段 Hf 模式年龄为 1933~2553 Ma, 说明宁多岩群物源区存在古元古代从亏损地幔分离进入地壳的重大地质事件, 即古元古代地壳增生事件; 少量 2854~3505 Ma 的锆石也具有负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 3784~4316 Ma 的两阶段 Hf 模式年龄, 表明宁多岩群物源区尚有更古老(冥古代)的地壳物质残留.

- 8 Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton. *Geology*, 1992, 20: 339–342
- 9 Song B, Nutman A P, Liu D Y, et al. 3800 to 2500 Ma crust in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China. *Precambrian Res*, 1996, 78: 79–94
- 10 Wan Y S, Liu D Y, Song B, et al. Geochemical and Nd isotopic compositions of 3.8 Ga meta-quartz diorite and trondhjemitic rocks from the Anshan area and their geological significance. *J Asian Earth Sci*, 2005, 24: 563–575
- 11 Black L P, Williams I S, Compston W. Four zircon ages from one rock: The history of a 3930 Ma old granulite from Mount Sones, Enderby Land, Antarctica. *Contrib Mineral Petrol*, 1986, 94: 427–437
- 12 Harley S L, Black L P. A revised Archean chronology for the Napier Complex, Enderby Land, from SHRIMP ion-microprobe studies. *Antar Sci*, 1997, 9: 74–91
- 13 Choi S H, Mukasa S B, Andronikov A V, et al. Lu-Hf systematics of the ultra-high temperature Napier Metamorphic Complex in Antarctica: Evidence for the early Archean differentiation of Earth's mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 246: 305–316
- 14 Sano Y, Terada K, Hidaka H, et al. Palaeoproterozoic thermal events recorded in the ~4.0 Ga Acasta gneiss, Canada: Evidence from SHRIMP U-Pb dating of apatite and zircon. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63: 899–905
- 15 Nutman A P, Friend C R L, Bennett V C. Review of the oldest (4400–3600 Ma) geological and mineralogical record: Glimpses of the beginning. *Episodes*, 2001, 24: 93–101
- 16 Gebauer D, Williams I S, Compston W, et al. The development of the Central European Continental crust since the Early Archaean based on conventional and ion-microprobe dating of up to 3.84 b.y. old detrital zircons. *Tectonophysics*, 1989, 157: 81–96
- 17 Mueller P A, Wooden J L, Nutman A P, et al. Early Archean crust in the northern Wyoming province Evidence from U-Pb ages of detrital zircons. *Precambrian Res*, 1998, 91: 295–307
- 18 Wilde S A, Valley J W, Peck W H, et al. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Ga ago. *Nature*, 2001, 409: 175–178
- 19 Hartmann L A, Endo I, Suita M T F, et al. Provenance and age delimitation of Quadrilátero Ferrífero sandstones based on zircon U-Pb isotopes. *J South Am Earth Sci*, 2006, 20: 273–285
- 20 Gehrels G E, DeCelles P G, Ojha T P, et al. Geologic and U-Pb geochronologic evidence for early Paleozoic tectonism in the Dadehdhura thrust sheet, far-west Nepal Himalaya. *J Asian Earth Sci*, 2006, 28: 385–408
- 21 Kröner A, Hegner E, Lehmann B, et al. Palaeozoic arc magmatism in the Central Asian Orogenic Belt of Kazakhstan: SHRIMP zircon ages and whole-rock Nd isotopic systematics. *J Asian Earth Sci*, 2008, 32: 118–130
- 22 Wu F Y, Yang J H, Liu X M, et al. Nd isotopic constrains on crustal formation in the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 2005, 24: 523–545
- 23 Wilde S A, Valley J W, Kita N T, et al. SHRIMP U-Pb and CAMECA 1280 oxygen isotope results from ancient detrital zircons in the Caozhuang Quartzite, eastern Hebei, North China Craton: Evidence for crustal reworking 3.8 Ga ago. *Am J Sci*, 2008, 308: 185–199
- 24 温春齐, 多吉, 范小平, 等. 西藏普兰石英岩中发现 41 亿年碎屑锆石. *地质学报*, 2006, 80: 1249–1251
- 25 多吉, 温春齐, 郭建慈, 等. 西藏 4.1 Ga 碎屑锆石年龄的发现. *科学通报*, 2007, 52: 19–22
- 26 Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age and Hf isotope evidence for 3.8 Ga crustal remnant and episodeic reworking of Archean crust in South China. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 252: 56–71
- 27 王洪亮, 陈亮, 孙勇, 等. 北秦岭西段奥陶纪火山岩中发现近 4.1 Ga 的捕虏锆石. *科学通报*, 2007, 52: 1685–1693
- 28 郑建平, Griffin W L, 汤华云, 等. 西部华夏地区深部可能存在与华北和扬子大陆相似的太古代基底. *高校地质学报*, 2008, 14: 549–557
- 29 郝子文, 饶荣标. 西南区区域地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999
- 30 西藏地矿局区调队邓柯分队. 1:20 万邓柯幅区域地质调查报告. 1994
- 31 四川地矿局区调队四分队. 1:20 万类乌齐幅、拉多幅区域地质调查报告. 1994
- 32 青海省地质调查院. 1:25 万治多县幅区域地质调查报告. 2006
- 33 青海省地质调查院. 1:25 万曲柔尕卡幅区域地质调查报告. 2005
- 34 李荣社, 计文化, 潘晓平, 等. 昆仑山及邻区地质图(1:1000000). 北京: 地质出版社, 2008
- 35 西安地质矿产研究所. 1:25 万玉树县幅区域地质调查报告. 2006
- 36 Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chem Geol*, 2002, 192: 59–79
- 37 Ludwig K R. Isoplot 3.0-A geochronological toolkit for Micro-soft Excel. Berkeley Geochronology Center, Spec Pub, 2003, 4: 1–70
- 38 Gao S, Liu X M, Yuan H L, et al. Analysis of forty-two major and trace elements of USGS and NIST SRM Glasses by LA-ICPMS. *Geostand News*, 2002, 22: 181–195
- 39 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. *科学通报*, 2003, 48: 1511–1520
- 40 第五春荣, 孙勇, 袁洪林, 等. 河南登封地区嵩山石英岩碎屑锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义. *科学通报*, 2008, 53: 1923–1934

- 41 Riveis T. Lithotectonic elements of the Grenville Province: Review and tectonic implication. *Precambrian Res*, 1997, 86: 117–154
- 42 陆松年. 从罗迪尼亚到冈瓦纳超大陆——对新元古代超大陆研究几个问题的思考. *地学前缘*, 2001, 8: 441–448
- 43 郝杰, 翟明国. 罗迪尼亚超大陆与晋宁运动和震旦系. *地质科学*, 2004, 39: 139–152
- 44 Kröner A. The Pan-African belt of northeastern and eastern Africa, Madagascar, southern India, Sri Lanka and East Antarctic: Terrane amalgamation during formation of the Gondwana supercontinent. In: Thorweihe U, Schandlmeier H, eds. *Geoscientific Research in Northeast Africa*. Rotterdam: Balkema, 1993. 3–9
- 45 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
- 46 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 2007, 23: 185–220
- 47 郑永飞, 张少兵. 华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化. *科学通报*, 2007, 52: 1–10
- 48 王成善, 伊海生, 李勇, 等. 西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价. 北京: 地质出版社, 2001. 1–59
- 49 黄继钧. 藏北羌塘盆地构造特征及演化. *中国区域地质*, 2001, 20: 178–186
- 50 黄继钧. 羌塘盆地基底构造特征. *地质学报*, 2001, 75: 333–337
- 51 李永铁, 罗建宁, 卢辉楠, 等. 青藏高原地层. 北京: 科学出版社, 2001. 10–30
- 52 王国芝, 王成善. 西藏羌塘基底变质岩系的解体 and 时代厘定. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2001, 31(增刊): 77–82
- 53 李才. 羌塘基底质疑. *地质论评*, 2003, 49: 4–9
- 54 李才, 董永胜, 翟庆国, 等. 青藏高原羌塘早古生代蛇绿岩-堆晶辉长岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义. *岩石学报*, 2008, 24: 31–36
- 55 许志琴, 杨经绥, 梁风华, 等. 喜马拉雅地体的泛非-早古生代造山事件年龄记录. *岩石学报*, 2005, 21: 1–12
- 56 宋述光, 李建清, 魏春景, 等. 滇西北怒江早古生代片麻状花岗岩的确定及其构造意义. *科学通报*, 2007, 52: 927–930
- 57 李才, 谢尧武, 沙绍礼, 等. 藏东八宿地区泛非期花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年. *地质通报*, 2008, 27: 64–68
- 58 Yu J H, Suzanne Y O, 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

补充材料:

表 S1 北羌塘昌都地块宁多岩群石榴石二云石英片岩(07ND-1)碎屑锆石 LA-ICP-MS 和 MC-ICP-MS U-Pb 同位素测年结果

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

表 S1 北羌塘昌都地块宁多岩群石榴石二云石英片岩(07ND-1)碎屑锆石 LA-ICP-MS 和 MC-ICP-MS U-Pb 同位素测年结果^{a)}

样点 编号	同位素比值								同位素年龄 (Ma)								同位素含量 (ppm)						Th/U	谐和 度(%)
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb	²⁰⁸ Pb	²³² Th	²³⁸ U		
	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ								
07ND-1-01	0.1080	0.0012	4.678	0.057	0.3142	0.0036	0.0805	0.0009	1765	10	1763	10	1761	18	1565	16	28.63	2586.18	2051.16	2468.97	8234.79	1027.05	8.02	100
07ND-1-02	0.0728	0.0009	1.891	0.024	0.1884	0.0022	0.0537	0.0006	1008	11	1078	8	1113	12	1058	11	<12.58	1027.30	484.09	583.08	3219.89	688.90	4.67	110
07ND-1-03	0.1533	0.0018	9.429	0.117	0.4459	0.0051	0.1198	0.0013	2383	9	2381	11	2377	23	2288	24	<12.38	650.14	578.23	534.01	1424.29	186.43	7.64	100
07ND-1-05	0.0946	0.0011	3.250	0.040	0.2492	0.0028	0.0771	0.0009	1519	10	1469	10	1434	15	1501	16	10.20	909.86	415.51	259.72	1194.34	478.12	2.50	94
07ND-1-06	0.0634	0.0008	1.062	0.014	0.1215	0.0014	0.0404	0.0004	721	12	735	7	739	8	800	9	<7.40	578.43	152.62	271.68	2554.82	638.08	4.00	101
07ND-1-08	0.0600	0.0007	0.833	0.011	0.1008	0.0012	0.0300	0.0003	620	13	615	6	619	7	597	7	11.22	534.43	117.86	115.79	1540.02	727.60	2.12	101
07ND-1-09	0.0570	0.0007	0.675	0.009	0.0859	0.0010	0.0257	0.0003	493	13	524	6	531	6	513	6	9.16	451.77	90.89	268.42	4431.38	748.22	5.92	101
07ND-1-10	0.0673	0.0008	1.278	0.016	0.1377	0.0016	0.0389	0.0004	847	11	836	7	832	9	772	8	35.86	2303.00	512.62	687.94	7304.20	2347.07	3.11	100
07ND-1-11	0.0942	0.0011	3.339	0.041	0.2569	0.0029	0.0762	0.0008	1513	10	1490	10	1474	15	1484	16	10.68	1917.57	522.82	367.55	2075.77	1082.35	1.92	97
07ND-1-12	0.0658	0.0008	1.150	0.015	0.1268	0.0015	0.0384	0.0004	800	12	777	7	769	8	762	8	<3.59	430.19	78.75	172.69	1954.39	497.40	3.93	99
07ND-1-13	0.2961	0.0033	28.925	0.352	0.7084	0.0080	0.1662	0.0018	3450	8	3451	12	3452	30	3108	32	<3.65	4101.39	3255.15	238.48	629.68	857.77	0.73	100
07ND-1-14	0.0772	0.0009	1.541	0.019	0.1447	0.0016	0.0422	0.0005	1126	11	947	8	871	9	835	9	13.14	1278.19	255.38	335.29	3520.18	1322.28	2.66	92
07ND-1-15	0.0673	0.0010	0.878	0.013	0.0947	0.0011	0.0390	0.0004	846	15	640	7	583	6	773	9	<3.28	165.67	27.90	76.68	877.52	264.74	3.31	91
07ND-1-16	0.0711	0.0009	1.583	0.020	0.1615	0.0018	0.0459	0.0005	961	12	964	8	965	10	906	10	8.69	1072.93	179.63	345.18	3404.38	1026.63	3.32	100
07ND-1-17	0.0700	0.0010	1.551	0.023	0.1606	0.0019	0.0453	0.0005	929	14	951	9	960	10	896	10	<3.35	357.51	57.29	97.50	978.82	347.51	2.82	101
07ND-1-18	0.0734	0.0009	1.903	0.024	0.1880	0.0021	0.0534	0.0006	1025	11	1082	8	1111	12	1052	11	3.99	1124.39	183.72	200.43	1716.06	942.67	1.82	108
07ND-1-19	0.0622	0.0008	0.950	0.012	0.1108	0.0013	0.0321	0.0004	681	12	678	6	677	7	639	7	5.49	784.15	105.80	62.37	892.21	1127.03	0.79	100
07ND-1-20	0.0660	0.0008	1.039	0.014	0.1141	0.0013	0.0401	0.0005	806	12	723	7	697	7	795	9	6.56	665.92	92.97	87.08	1001.85	938.44	1.07	96
07ND-1-21	0.0765	0.0010	2.167	0.030	0.2053	0.0023	0.0580	0.0007	1109	12	1170	10	1204	13	1139	13	<2.39	257.02	38.84	63.35	510.46	207.37	2.46	109
07ND-1-22	0.0889	0.0011	2.874	0.037	0.2345	0.0027	0.0711	0.0008	1401	11	1375	10	1358	14	1388	15	11.78	739.43	127.02	101.36	668.48	527.27	1.27	97
07ND-1-23	0.0723	0.0009	1.785	0.023	0.1791	0.0020	0.0524	0.0006	994	12	1040	8	1062	11	1032	12	9.85	632.10	86.56	48.65	436.87	595.93	0.73	107
07ND-1-24	0.0709	0.0008	1.771	0.022	0.1810	0.0020	0.0451	0.0005	955	12	1035	8	1073	11	891	10	2.96	1532.93	201.98	97.57	1021.29	1443.26	0.71	104
07ND-1-25	0.1185	0.0014	4.177	0.053	0.2556	0.0029	0.0993	0.0011	1544	55	1475	20	1427	16	1418	16	<2.00	944.71	204.10	81.21	386.85	636.02	0.61	92
07ND-1-26	0.0715	0.0009	1.661	0.022	0.1685	0.0019	0.0460	0.0005	972	12	994	8	1004	11	910	10	<1.91	467.89	58.82	45.85	470.53	482.82	0.97	103
07ND-1-27	0.0838	0.0011	2.226	0.031	0.1926	0.0022	0.0546	0.0006	1289	12	1189	10	1135	12	1074	12	<1.75	181.42	26.03	85.32	758.77	171.16	4.43	95
07ND-1-29	0.0690	0.0009	1.631	0.021	0.1714	0.0019	0.0486	0.0006	899	12	982	8	1020	11	958	11	5.32	998.90	115.36	37.56	370.21	1049.69	0.35	104
07ND-1-31	0.1069	0.0014	4.139	0.055	0.2807	0.0032	0.0776	0.0009	1748	11	1662	11	1595	16	1511	17	<1.75	333.29	56.23	65.45	406.32	221.60	1.83	91
07ND-1-32	0.0724	0.0009	1.883	0.025	0.1887	0.0021	0.0475	0.0006	996	12	1075	9	1114	12	938	11	<1.91	487.30	54.04	25.65	259.15	481.84	0.54	104
07ND-1-33	0.0738	0.0010	1.540	0.021	0.1514	0.0017	0.0462	0.0005	1035	12	946	8	909	10	912	10	4.18	441.98	49.72	53.23	558.21	555.83	1.00	96
07ND-1-34	0.0683	0.0009	1.253	0.017	0.1331	0.0015	0.0403	0.0005	876	13	825	8	805	9	799	9	3.22	505.41	52.31	60.17	721.95	727.40	0.99	98
07ND-1-36	0.0706	0.0009	1.588	0.022	0.1630	0.0018	0.0457	0.0005	947	13	965	8	973	10	903	10	<1.47	467.46	48.27	33.32	353.74	563.39	0.63	101
07ND-1-37	0.1038	0.0013	3.970	0.053	0.2773	0.0031	0.0726	0.0009	1694	11	1628	11	1578	16	1417	17	<1.66	1124.78	171.20	27.71	183.86	803.14	0.23	93
07ND-1-38	0.0786	0.0011	1.762	0.025	0.1625	0.0019	0.0457	0.0005	1163	13	1032	9	971	10	902	10	1.84	190.55	21.41	42.34	450.90	234.19	1.93	94

样点 编号	同位素比值								同位素年龄 (Ma)								同位素含量 (ppm)						Th/U	谐和 度 (%)
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb	²⁰⁸ Pb	²³² Th	²³⁸ U		
	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ								
07ND-1-41	0.0581	0.0009	0.761	0.012	0.0950	0.0011	0.0290	0.0004	533	16	575	7	585	6	577	7	<1.18	215.13	16.95	40.90	689.26	471.03	1.46	102
07ND-1-42	0.0700	0.0009	1.599	0.022	0.1657	0.0019	0.0431	0.0005	929	13	970	8	988	10	853	10	<0.88	884.03	83.14	34.89	395.19	1119.24	0.35	102
07ND-1-43	0.0779	0.0010	2.182	0.030	0.2030	0.0023	0.0565	0.0007	1145	12	1175	10	1191	12	1112	13	<1.00	646.25	67.02	68.84	595.02	672.95	0.88	104
07ND-1-44	0.0620	0.0010	0.773	0.013	0.0904	0.0010	0.0255	0.0003	675	17	581	7	558	6	509	6	<1.31	167.08	13.66	32.98	632.77	393.98	1.61	96
07ND-1-45	0.0764	0.0011	2.140	0.032	0.2031	0.0023	0.0569	0.0007	1106	14	1162	10	1192	12	1118	14	<0.97	227.35	22.69	15.91	136.83	240.38	0.57	108
07ND-1-47	0.0693	0.0010	1.500	0.022	0.1570	0.0018	0.0421	0.0005	908	14	930	9	940	10	833	10	<1.05	231.17	20.40	18.38	214.10	323.70	0.66	101
07ND-1-49	0.4195	0.0056	45.785	0.624	0.7915	0.0089	0.1847	0.0022	3981	9	3905	14	3758	32	3425	38	1.41	2899.48	1523.75	176.29	467.96	817.51	0.57	94
07ND-1-50	0.0918	0.0013	2.384	0.034	0.1883	0.0021	0.0651	0.0008	1172	63	1121	19	1095	12	1090	12	23.66	744.97	95.43	91.42	602.97	885.39	0.68	93
07ND-1-51	0.1047	0.0015	4.052	0.058	0.2807	0.0032	0.0873	0.0011	1640	46	1610	17	1588	17	1583	17	1.47	388.53	49.42	29.41	165.23	318.25	0.52	97
07ND-1-52	0.0774	0.0012	1.108	0.018	0.1039	0.0012	0.0407	0.0006	760	64	657	13	627	7	623	7	<1.10	132.78	12.39	9.33	112.64	295.99	0.38	95
07ND-1-54	0.0780	0.0011	1.947	0.028	0.1809	0.0020	0.0563	0.0007	1108	48	1082	13	1070	11	1068	11	4.31	625.68	58.07	34.96	304.82	812.84	0.38	97
07ND-1-55	0.2411	0.0034	18.816	0.266	0.5661	0.0064	0.1437	0.0018	3127	10	3032	14	2892	26	2713	32	<0.80	635.70	181.01	39.45	134.87	265.89	0.51	92
07ND-1-56	0.0878	0.0013	2.877	0.043	0.2378	0.0027	0.0681	0.0009	1377	13	1376	11	1375	14	1331	16	<1.07	407.59	41.69	42.80	308.83	411.66	0.75	100
07ND-1-58	0.0710	0.0010	1.466	0.022	0.1497	0.0017	0.0440	0.0006	958	14	916	9	899	9	871	11	<0.95	425.18	34.75	18.97	211.67	692.06	0.31	98
07ND-1-60	0.0760	0.0011	1.878	0.028	0.1792	0.0020	0.0479	0.0006	1096	14	1073	10	1062	11	945	12	0.80	447.46	38.62	32.25	323.61	610.96	0.53	97
07ND-1-1b	0.0816	0.0010	1.795	0.020	0.1596	0.0014	0.0665	0.0007	1236	24	1044	7	955	8	1301	13	41.85	372.03	69.62	51.30	179.24	749.17	0.24	91
07ND-1-2b	0.1591	0.0020	9.271	0.106	0.4227	0.0039	0.1374	0.0015	2446	21	2365	10	2273	18	2602	27	3.10	163.83	33.67	18.62	87.99	120.95	0.73	93
07ND-1-4b	0.0779	0.0011	2.035	0.028	0.1894	0.0018	0.0569	0.0007	1145	29	1127	9	1118	10	1118	13	2.06	92.00	9.22	8.15	90.35	151.52	0.60	98
07ND-1-5b	0.0781	0.0010	1.945	0.022	0.1807	0.0016	0.0590	0.0006	1149	25	1097	8	1071	9	1160	12	1.32	193.87	19.61	16.59	173.33	326.90	0.53	93
07ND-1-7b	0.0703	0.0008	1.654	0.018	0.1707	0.0015	0.0500	0.0005	937	24	991	7	1016	8	987	10	1.56	477.07	43.69	31.10	389.35	866.35	0.45	108
07ND-1-8b	0.0704	0.0008	1.598	0.017	0.1648	0.0015	0.0490	0.0005	939	24	970	7	983	8	967	10	1.71	450.25	41.14	30.48	388.18	844.21	0.46	101
07ND-1-9b	0.1020	0.0012	4.031	0.043	0.2868	0.0026	0.0852	0.0010	1660	22	1640	9	1625	13	1652	19	1.70	343.31	45.89	6.94	52.06	357.20	0.15	98
07ND-1-10b	0.0962	0.0011	3.756	0.040	0.2833	0.0025	0.0803	0.0008	1552	22	1584	9	1608	13	1562	15	1.49	487.32	61.09	39.08	306.34	540.22	0.57	104
07ND-1-11b	0.0800	0.0010	2.211	0.026	0.2006	0.0018	0.0605	0.0007	1197	25	1185	8	1179	10	1187	12	2.00	182.57	19.00	16.76	168.20	275.67	0.61	98
07ND-1-12b	0.0779	0.0010	2.148	0.025	0.2002	0.0018	0.0574	0.0006	1143	25	1165	8	1176	10	1128	12	1.56	204.06	20.66	13.59	143.67	308.67	0.47	103
07ND-1-14b	0.1620	0.0019	10.243	0.106	0.4589	0.0041	0.1219	0.0012	2476	19	2457	10	2435	18	2325	22	2.08	1410.02	278.26	71.59	374.99	1084.95	0.35	98
07ND-1-15b	0.0706	0.0010	1.291	0.017	0.1327	0.0012	0.0395	0.0004	946	29	842	8	803	7	782	9	1.37	170.44	16.29	17.34	267.65	399.03	0.67	95
07ND-1-16b	0.0669	0.0008	0.998	0.011	0.1082	0.0010	0.0384	0.0004	834	25	703	6	663	6	761	8	6.86	655.95	60.86	24.00	295.23	1780.24	0.17	94
07ND-1-18b	0.0754	0.0010	1.841	0.023	0.1772	0.0016	0.0599	0.0007	1079	26	1060	8	1051	9	1175	14	1.35	200.16	19.60	8.64	92.26	354.52	0.26	97
07ND-1-19b	0.0715	0.0009	1.549	0.018	0.1573	0.0014	0.0544	0.0006	971	26	950	7	942	8	1070	11	1.54	275.96	25.51	23.95	274.24	542.42	0.51	99
07ND-1-20b	0.0917	0.0012	3.329	0.039	0.2634	0.0024	0.0765	0.0008	1461	24	1488	9	1507	12	1490	16	1.56	231.92	27.43	22.02	182.54	287.95	0.63	103
07ND-1-21b	0.0758	0.0010	1.772	0.021	0.1697	0.0016	0.0598	0.0007	1089	26	1035	8	1010	9	1175	13	3.79	413.04	39.85	27.66	434.39	823.55	0.53	93
07ND-1-22b	0.3068	0.0036	30.082	0.320	0.7113	0.0065	0.1762	0.0021	3505	18	3490	10	3463	25	3281	35	1.84	1536.12	610.09	10.91	38.74	674.70	0.06	99
07ND-1-23b	0.1535	0.0020	9.685	0.117	0.4578	0.0044	0.1385	0.0015	2385	22	2405	11	2430	19	2622	27	1.03	314.93	58.49	45.24	228.10	295.87	0.77	102

续表 S1

样点 编号	同位素比值								同位素年龄 (Ma)								同位素含量 (ppm)						Th/U	谐和 度(%)
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb	²⁰⁸ Pb	²³² Th	²³⁸ U		
	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ								
07ND-1-25b	0.0741	0.0011	1.772	0.025	0.1736	0.0017	0.0557	0.0007	1043	30	1035	9	1032	9	1096	13	1.54	111.59	10.66	10.66	118.57	198.95	0.60	99
07ND-1-26b	0.1647	0.0019	10.819	0.118	0.4765	0.0044	0.1747	0.0019	2505	20	2508	10	2512	19	3255	33	9.05	1337.01	282.27	36.17	136.08	882.87	0.15	100
07ND-1-27b	0.0969	0.0014	3.551	0.047	0.2659	0.0026	0.0788	0.0009	1565	26	1539	11	1520	13	1534	17	1.47	116.68	14.55	14.73	116.34	136.20	0.85	97
07ND-1-30b	0.1036	0.0013	4.248	0.049	0.2976	0.0028	0.0863	0.0009	1689	22	1683	9	1680	14	1673	17	1.70	454.76	60.62	81.35	580.11	467.17	1.24	99
07ND-1-31b	0.0744	0.0010	1.726	0.022	0.1682	0.0016	0.0612	0.0008	1053	27	1018	8	1002	9	1201	16	1.39	320.83	31.39	8.95	94.70	644.92	0.15	95
07ND-1-34b	0.0950	0.0016	3.528	0.056	0.2695	0.0027	0.0807	0.0010	1528	31	1534	13	1538	14	1568	19	<1.25	82.79	10.39	13.65	109.90	105.91	1.04	101
07ND-1-35b	0.0971	0.0012	3.805	0.044	0.2842	0.0027	0.0842	0.0009	1569	23	1594	9	1613	13	1633	17	1.75	765.56	95.79	48.19	351.69	825.54	0.43	103
07ND-1-36b	0.0667	0.0011	1.391	0.021	0.1514	0.0015	0.0455	0.0006	827	33	885	9	909	8	900	11	1.36	104.24	8.93	10.12	139.25	217.27	0.64	103
07ND-1-37b	0.0663	0.0010	0.961	0.014	0.1052	0.0010	0.0385	0.0005	814	32	684	7	645	6	764	9	4.94	171.89	18.04	23.63	296.01	495.23	0.60	94
07ND-1-38b	0.0714	0.0019	1.654	0.043	0.1679	0.0019	0.0605	0.0012	970	53	991	16	1001	11	1187	23	<1.40	21.02	2.10	1.74	16.17	42.50	0.38	103
07ND-1-40b	0.0713	0.0011	1.800	0.026	0.1831	0.0018	0.0526	0.0007	966	30	1046	9	1084	10	1036	12	<1.45	98.10	9.09	11.00	126.47	159.83	0.79	104
07ND-1-42b	0.1696	0.0022	12.912	0.164	0.5521	0.0054	0.1455	0.0017	2554	22	2673	12	2834	22	2745	31	<2.44	166.15	36.38	20.61	85.37	87.99	0.97	110
07ND-1-43b	0.1567	0.0021	10.399	0.135	0.4812	0.0047	0.1358	0.0016	2421	23	2471	12	2533	21	2573	29	<1.36	145.23	29.02	20.34	91.23	95.15	0.96	105
07ND-1-44b	0.1627	0.0023	11.342	0.156	0.5054	0.0051	0.1372	0.0017	2484	24	2552	13	2637	22	2598	30	1.43	98.04	20.49	16.51	74.66	60.85	1.23	106
07ND-1-45b	0.0679	0.0011	1.233	0.020	0.1318	0.0013	0.0399	0.0005	865	34	816	9	798	8	790	10	<1.46	77.81	6.66	9.04	141.22	184.31	0.77	98
07ND-1-47b	0.0596	0.0011	0.859	0.016	0.1046	0.0011	0.0319	0.0004	588	41	630	9	642	6	635	8	<1.29	55.98	4.29	7.41	144.06	167.24	0.86	102
07ND-1-48b	0.0733	0.0012	1.705	0.028	0.1688	0.0017	0.0542	0.0007	1021	34	1010	10	1005	9	1066	14	1.85	112.66	10.65	13.33	160.86	253.76	0.63	98
07ND-1-49b	0.1045	0.0014	4.079	0.053	0.2832	0.0028	0.0941	0.0011	1705	25	1650	11	1608	14	1818	21	1.67	320.05	42.83	32.54	212.70	353.31	0.60	94
07ND-1-50b	0.2542	0.0033	23.882	0.297	0.6812	0.0066	0.1717	0.0021	3211	20	3264	12	3349	25	3203	35	1.66	1236.38	402.58	55.23	194.53	548.46	0.35	104
07ND-1-52b	0.0802	0.0016	2.122	0.042	0.1918	0.0021	0.0523	0.0007	1202	40	1156	14	1131	11	1030	14	<1.45	60.18	6.40	9.22	109.65	98.39	1.11	94
07ND-1-55b	0.2035	0.0027	15.508	0.204	0.5526	0.0055	0.1487	0.0020	2854	22	2847	13	2836	23	2803	34	<1.42	436.70	113.55	13.56	57.09	249.69	0.23	99
07ND-1-56b	0.0687	0.0011	1.513	0.025	0.1597	0.0016	0.0530	0.0007	888	34	936	10	955	9	1045	14	1.95	297.15	26.93	41.02	522.93	676.03	0.77	102
07ND-1-57b	0.0670	0.0010	1.302	0.020	0.1409	0.0014	0.0420	0.0005	837	32	847	9	850	8	831	10	<1.65	156.86	13.29	48.41	714.01	345.66	2.07	100
07ND-1-58b	0.0589	0.0010	0.824	0.014	0.1014	0.0010	0.0289	0.0004	564	37	610	8	623	6	575	8	<1.45	216.39	16.40	21.39	475.60	726.53	0.65	102
07ND-1-59b	0.1604	0.0024	11.058	0.161	0.4999	0.0052	0.1364	0.0018	2459	25	2528	14	2613	22	2584	33	<1.66	146.78	30.14	15.42	70.18	91.49	0.77	106
07ND-1-60b	0.0723	0.0012	1.758	0.029	0.1762	0.0018	0.0515	0.0007	995	34	1030	11	1046	10	1016	13	<1.43	113.38	10.41	16.40	199.32	203.56	0.98	105
07ND-1-61b	0.0718	0.0012	1.398	0.022	0.1411	0.0015	0.0552	0.0009	979	32	888	9	851	8	1086	17	1.53	171.19	15.44	5.42	67.21	385.01	0.17	96
07ND-1-62b	0.1458	0.0021	8.756	0.123	0.4353	0.0044	0.1326	0.0017	2297	24	2313	13	2330	20	2517	31	<1.38	475.67	88.57	32.19	155.88	350.19	0.45	101
07ND-1-63b	0.1107	0.0017	5.555	0.083	0.3637	0.0037	0.0880	0.0012	1811	27	1909	13	2000	18	1704	23	<1.48	245.22	34.24	14.81	105.58	216.55	0.49	110
07ND-1-64b	0.1654	0.0025	11.770	0.176	0.5157	0.0054	0.1396	0.0019	2511	25	2586	14	2681	23	2642	33	<1.37	110.33	23.29	16.24	73.10	68.62	1.07	107
07ND-1-65b	0.0718	0.0012	1.773	0.029	0.1790	0.0019	0.0537	0.0008	980	33	1036	11	1061	10	1058	14	<1.48	125.88	11.53	10.15	118.08	221.85	0.53	108
07ND-1-66b	0.1563	0.0022	9.862	0.141	0.4572	0.0047	0.1341	0.0018	2416	24	2422	13	2427	21	2544	32	1.60	568.50	113.08	27.98	130.24	392.72	0.33	100
07ND-1-68b	0.1674	0.0024	10.602	0.151	0.4588	0.0047	0.1255	0.0016	2532	24	2489	13	2434	21	2389	30	<0.97	629.30	134.56	44.68	222.08	428.92	0.52	96

a) 07ND-1-1~07ND-1-60 为 LA-ICP-MS 测试结果, 07ND-1-1b~07ND-1-68b 为 MC-ICP-MS U-Pb 测试结果, 使用 Andersen 等的软件进行了普通铅校正; ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值 > 1000 Ma, 谐和度 = (²⁰⁶Pb/²³⁸U) / (²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb) × 100; ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值 < 1000 Ma, 谐和度 = (²⁰⁶Pb/²³⁸U) / (²⁰⁷Pb/²³⁵U) × 100; 1 ppm = 1 μg/g