

东准噶尔阿尔曼泰蛇绿混杂带中发现~4.0 Ga 碎屑锆石

黄岗^{①*}, 牛广智^①, 张占武^①, 王新录^①, 徐学义^②, 郭俊^①, 宇峰^①

① 陕西省地质矿产勘察开发局区域地质矿产研究院, 咸阳 712000;

② 西安地质矿产研究所, 西安 710054

* 联系人, E-mail: hg1104220@yahoo.cn

2012-11-16 收稿, 2013-03-22 接受, 2013-08-16 网络版发表

中国地质调查局项目(2010010101)资助

摘要 东准噶尔是中亚造山带的重要组成部分, 采用 LA-(MC)-ICPMS 锆石微区原位 U-Pb 测年和 Hf 同位素测定方法, 在新疆东准噶尔地区阿尔曼泰蛇绿混杂带中的沉积岩块中发现了~4.0 Ga 碎屑锆石. 这是迄今在新疆东准噶尔地区获得的最古老年龄记录, 也是中亚造山带内发现的第 1 粒大于 4.0 Ga 的锆石, 为进一步寻找冥古宙地壳物质提供了新的线索. 该粒锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -5.2, 两阶段模式年龄为 4474 Ma, 表明其物源区尚有十分古老(冥古代)的陆壳物质. 141 个测年有效数据中还获得 3.6~3.1 Ga 碎屑锆石年龄以及 2.53~2.37, 1.14~0.89 和 0.47~0.42 Ga 三组年龄集中区, 主峰值年龄为~446 Ma, 其中最年轻的 5 粒碎屑锆石 U-Pb 年龄为 426 ± 4 Ma, 限定了该沉积岩块最老沉积时代. 碎屑锆石的 Hf 同位素研究表明, 对于 0.47~0.42 Ga 这一组碎屑锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 0.282156~0.282850, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -9.3~+12.0, 具有相对较老的 Hf 模式年龄为 2011~646 Ma, 与阿勒泰造山带中早古生代火成岩和片麻岩锆石年龄及 Hf 同位素特征相似, 而明显区别于东准噶尔地体. 在研究对象长石杂砂岩的物质结构及碎屑锆石的形态、内部结构、年龄分布及 Hf 同位素组成特点的基础上, 结合区域地质资料综合分析, 认为东准噶尔地区阿尔曼泰蛇绿构造混杂带中的沉积岩块的沉积时代可能为晚志留世, 其物源主要来自北侧的阿勒泰造山带, 暗示了在晚志留世期间阿尔曼泰蛇绿岩所代表的早古生代大洋已经关闭, 东准噶尔北缘与阿勒泰造山带已联为一体, 二者共同构成了古西伯利亚古陆南缘的一个边缘造山带.

关键词

东准噶尔
阿尔曼泰蛇绿
混杂带
冥古宙
碎屑锆石
U-Pb 年龄
Hf 同位素

单颗粒碎屑锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素组成分析是沉积物源区示踪研究非常重要的工具^[1-5]. 锆石具有极好的抗风化、抗磨蚀和热蚀变的能力, 在搬运、沉积循环中不易被破坏. 锆石广泛存在于中、酸性岩浆岩和中、高级(角闪岩相、麻粒岩相和榴辉岩相)变质岩中, 记录了地壳岩浆和变质事件. 通过单颗粒碎屑锆石的 U-Pb 年龄和 Hf 同位素测定相结合的技术, 不仅可以确定每个锆石颗粒的年龄, 而且可以给出沉积岩源区组成的信息, 结合周缘地质体出露情况及构造演化特征进而界定其物源区^[6-8]. 同时,

沉积物中碎屑锆石 U-Pb 年龄谱具有丰富的年代学信息, 它们不仅提供了详细的有关古老地壳基底组成的年代学证据, 而且界定了沉积岩形成时代的下限^[9-11]. 特别是在造山带的物质组成、大地构造亲缘性和反演盆山耦合体系等领域中具有独特的优势^[12,13].

地球的形成和早期演化一直是地球科学研究的重要内容之一, 备受国内外地质学家们的关注, 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^[14]. 由于后期的地质作用改造, 致使地球

引用格式: 黄岗, 牛广智, 张占武, 等. 东准噶尔阿尔曼泰蛇绿混杂带中发现~4.0 Ga 碎屑锆石. 科学通报, 2013, 58: 2966-2979

英文版见: Huang G, Niu G Z, Zhang Z W, et al. Discovery of ~4.0 Ga detrital zircons in the Aermantai ophiolitic mélangé, East Junggar, northwest China. Chin Sci Bull, 2013, 58: 3645-3663, doi: 10.1007/s11434-013-5842-y

上形成于冥古宙(4.56~3.85 Ga)的岩石分布十分有限^[15,16]。迄今为止, ≥ 3.8 Ga 的地壳岩石仅在格陵兰^[17,18]、加拿大^[19,20]、中国鞍山^[21-23]和东南极^[24-26]地区被发现。加拿大 Wopmay 造山带中 4.0 Ga 的 Acasta 片麻岩^[27]是地球上目前发现的最古老岩石。尽管地球早期形成的岩石保存的非常有限, 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^[28]。国内外地球科学家经过长期不懈的探索, 在世界多个地区均发现了 ≥ 3.8 Ga 的碎屑锆石, 国外包括在德国巴伐利亚东北^[29]、美国怀俄明州北部^[30]、西澳 Yilgarn 克拉通^[31]、巴西圣弗朗西斯科克拉通^[32]、尼泊尔西部高喜马拉雅地区^[33]及中亚造山带内哈萨克斯坦北部^[34]等地区, 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^[31]。国内在寻找和研究最古老岩石和锆石方面也取得了重要进展, 前人相继在河北迁西县^[14,35-37]、西藏普兰县^[38,39]、湖北宜昌^[40]、甘肃两当县^[41,42]、广东东南部平乐-北江^[43]及青海玉树县^[44]等地区发现了 ≥ 3.8 Ga 的碎屑锆石。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。因此, 上述这些地区发现 ≥ 3.8 Ga 的碎屑锆石无疑对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。

笔者通过锆石 LA-(MC)-ICPMS 微区 U-Pb 测年和 Hf 同位素测定方法, 在新疆东准噶尔地区阿尔曼泰蛇绿混杂带中的沉积岩块中发现了 ~ 4.0 Ga 碎屑锆石, 这是迄今为止东准噶尔地区发现的最古老地壳年龄记录, 同时也是中亚造山带中目前发现的形成时代最老的锆石, 这一发现对研究该地区早期地壳的形成演化具有重要意义。

1 地质背景及其样品特征

准噶尔地块位于中亚造山带的中部, 传统上将准噶尔地块划分为西准噶尔地体、准噶尔盆地和东准噶尔地体 3 个组成部分(图 1(a))。本次研究区位于东准噶尔地体中北部, 准噶尔盆地的东北缘。东准噶尔地体北以额尔齐斯断裂带为界与中国阿尔泰山造山带相邻, 南以卡拉麦里断裂带为界与准噶尔盆地和天山造山带毗连, 被认为是显生宙增生造山带^[46,47]。在

构造单元划分上该地体从北向南依次为都拉特复合岛弧、阿尔曼泰蛇绿混杂带、野马泉复合岛弧、卡拉麦里蛇绿混杂带和将军增生杂岩。由于其复杂的构造演化过程, 东准噶尔地体及其邻区成为近年来地学研究的热点地区之一^[48-53]。

阿尔曼泰蛇绿混杂带位于东准噶尔地体的中北部(图 1(b)), 呈南东-北西走向从中蒙边界附近的北塔山北坡, 向北西通过阿尔曼泰山北坡, 沿乌伦古河向北西延伸到扎河坝地区, 然后被准噶尔盆地第四系沙漠覆盖, 总计长约 130 多千米。在该带中可以见到除席状岩墙群外所有组成蛇绿岩的岩石类型, 包括蛇纹石化方辉橄橄榄岩、纯橄岩、辉石岩、堆晶辉长岩、辉绿岩、枕状和块状玄武岩、放射虫硅质岩等^[55], 在纯橄岩中偶尔可以见到条带状铬铁矿^[56], 以上岩石类型均以岩片或岩块产出。同时在扎河坝地区的蛇绿混杂带中, 相继发现洋内弧成因的富铌玄武岩^[57]和超高压岩石岩块, 其中超高压岩块主要有二辉橄橄榄岩(橄橄榄石含有定向分布的磁铁矿出熔体)、含超硅和超钛石榴石的石榴辉石岩、石英菱镁岩和榴闪岩^[58-60], 表明存在洋壳的超深俯冲作用。无论在扎河坝、阿尔曼泰山及北塔山, 蛇绿岩基本都构造侵位于晚古生代火山-沉积岩系中。在北塔山和阿尔曼泰山, 可见蛇绿混杂带北界发育南倾的向北逆冲大型断裂带。在扎河坝地区蛇绿岩中辉长岩和斜长花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 489 ± 4 Ma^[61]和 496 ± 6 Ma^[62], 在阿尔曼泰山西侧兔子泉一带蛇绿岩中斜长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 503 ± 7 Ma^[63], 这些年龄信息指示了该蛇绿岩形成时代为晚寒武世-早奥陶世。

本文的研究重点是阿尔曼泰蛇绿混带中的沉积岩块。20 世纪 90 年代初, 新疆一区调队开展的 1:5 万区域地质调查工作, 在结勒德喀拉一带填绘出了阿尔曼泰蛇绿构造混杂带南部发育区, 称为结勒德喀拉蛇绿混杂带(图 1(c))。该混杂带呈北西-南东向狭长分布, 出露宽度达 2 km, 其北侧与上奥陶统大柳沟组呈断层接触, 东侧被中泥盆统北塔山组不整合覆盖, 南侧与上石炭统巴塔玛依内山组呈高角度断层接触^[64]。本次野外地质调查表明, 该蛇绿构造混杂带主要包括规模大小不等的变超基性岩(蛇纹岩)、辉长岩、闪长岩、硅质岩等岩块, 它们为蛇绿岩肢解的产物, 这些岩块呈透镜状或不规则长条状产出, 其中超基性岩蚀变较强, 为含铬尖晶石的方解石岩、

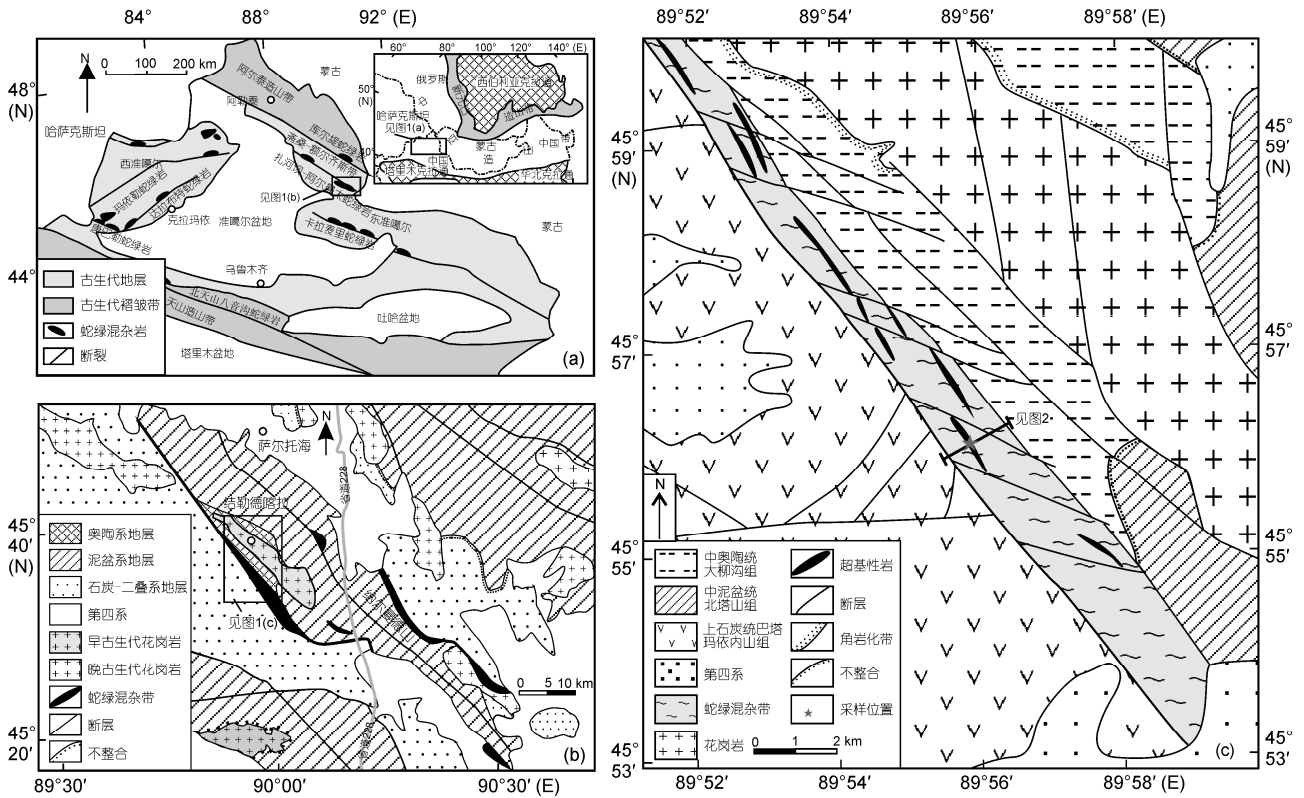


图1 新疆东准噶尔及邻区地质简图

(a) 准噶尔地质简图(据 Chen 等人^[45]修改); (b) 东准噶尔阿尔曼泰一带地质简图(据王洪亮等人^[54]修改); (c) 结勒德德拉一带地质简图(据 1:5 万加勒帕克依增德幅区调资料^[64]修改)

蛇纹石化纯橄岩、蛇纹岩等,同时也包含了不同时期的火山岩和沉积岩岩块或岩片,岩性主要有安山岩、安山质角砾熔岩、岩屑砂岩、长石岩屑砂岩、长石杂砂岩(图2),可见斜歪、顶厚褶皱,边部叠加韧性断裂,规模不等,代表了洋陆转换过程中的弧后盆地、弧前盆地或大陆斜坡沉积。基质主体由发育片理化细碎屑岩及各种岩块研磨细化物质组成。我们曾在变辉长岩中获得 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为 508 ± 4 Ma (另文报道)。关于蛇绿混杂带中沉积岩块的形成时代,存在较大的争议。1:20 万卡姆斯特幅、奥克什山幅将其划分为中泥盆统平顶山组^[65,66],1:20 万恰库尔特幅划为中泥盆统蕴都喀拉组^[67],1:5 万加勒帕克依增德幅划分为中奥陶统科克萨依组^[64],在最新出版的中国天山及邻区 1:100 万地质图将该地层厘定为中奥陶统乌列盖组^[54]。由于缺乏古生物化石的限定,加之同位素年代学资料的匮乏,目前其时代的确定还仅仅是依据区域地层对比,这严重制约了对区域构造演化历史的认识。本次采样点正是来自该蛇绿

混杂带中的沉积岩块中,其与南侧变超基性岩(蛇纹岩)和北侧岩屑砂岩均呈高角度断层接触(图2)。采样位置 GPS 坐标为: $45^{\circ}56'04.2''N, 89^{\circ}55'54.8''E$ 。样品岩性为长石杂砂岩,岩石呈绿灰色,中-细粒砂状结构,中层状构造,单层厚度约 15 cm。显微镜下观察,岩石主要由碎屑物(60%~65%)和填隙物(30%~35%)组成,碎屑物主要为石英(30%~35%)和长石(25%~30%),粒径一般为 0.15~0.30 mm,次棱角状,显示分选性和磨圆度均较差。填隙物主要由绢云母、绿泥石及少量方解石组成。岩石整体呈杂基支撑,基底式胶结,其结构成熟度较低,表明为搬运距离较短、快速堆积的产物。

2 分析方法

用于测年的砂岩样品在核工业 203 所采用常规方法进行粉碎,并用浮选和电磁选方法进行分选,最后在双目显微镜下挑选出形态较为完整、无裂痕、无包裹体的锆石作为测定对象。将分选出来的锆石样品置

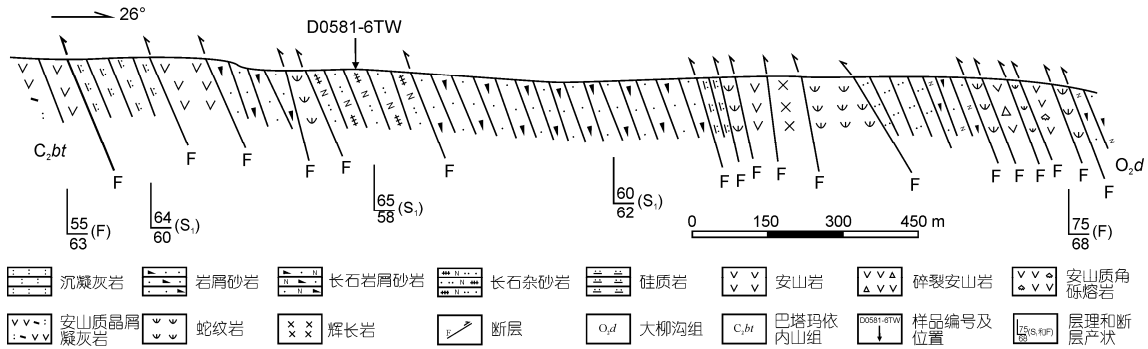


图2 阿尔曼泰蛇绿混杂带实测地质剖面图

于环氧树脂中，然后用无色透明的环氧树脂固定，待环氧树脂充分固化后抛光使锆石露出一个平面，最后对锆石进行可见光显微照相、阴极发光(CL)显微图像和LA-ICPMS锆石U-Pb同位素组成测定。锆石的阴极发光显微照相在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室的LEO1450VP扫描电子显微镜上完成，分析电压为15 kV。

锆石U-Pb年代学分析测试工作分别在中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室和西北大学大陆动力学国家重点实验室的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)上完成。两家测试单位的LA-ICP-MS激光剥蚀系统均为美国NewWave公司生产的UP193FX型193 nmArF准分子系统，激光器来自于德国ATL公司，ICP-MS为Agilent7500a。但标样方法略有不同，其中中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室采Plesovice^[68]和Qinghu^[69]标准锆石作为外标进行基体校正，成分标样采用NIST SRM 612，在测试过程中每10个未知样品点插入一组标样(锆石标样和成分标样)。西北大学大陆动力学国家重点实验室采用91500和GJ-1标准锆石作为外标进行基体校正，成分标样采用NIST SRM 610，在测试过程中每6个未知样品点插入一组标样(锆石标样和成分标样)。上述两个实验室分析的样品的同位素比值及元素含量计算均采用GLITTER(ver 4.0, Macquarie University)程序，普通铅校正采用Anderson^[70]提出的ComPbCorr#3.17校正程序，U-Pb谐和图和年龄权重平均计算采用Isoplot/Ex_ver 3.0程序^[71]完成。

锆石的Lu-Hf同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成，使用仪器为Nu Plasma HR(Wrexham, UK)多接收电感耦合等离子体质谱仪

(MC-ICPMS)和GeoLas200M激光剥蚀系统Neptune型，具体的分析步骤和流程见Yuan等人^[72]。激光剥蚀以氦气作为剥蚀物质的载气，斑束直径为~32 μm，频率为10 Hz，激光能量的密度为10 J cm⁻²。采用¹⁷⁶Lu/¹⁷⁵Lu=0.02669^[73]和¹⁷⁶Yb/¹⁷²Yb=0.5886^[74]进行样品¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf和¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf比值同量异位干扰校正。在样品测定期间，使用标准锆石91500和GJ-1进行仪器状态监控和样品校正。91500的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf为0.282295±0.000029 (n=17, 2σ)，GJ-1的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf为0.282049±0.000023 (n=10, 2σ)，与二者推荐值分别为0.2823075±0.000058(2σ)^[75]和0.282015±0.000019(2σ)^[76]基本吻合。计算ε_{Hf}(t)时，¹⁷⁶Lu的衰变系数为1.865×10⁻¹¹ a⁻¹^[77]，球粒陨石的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf和¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf分别为0.282772和0.0332^[78]。单阶段Hf模式年龄(T_{DM1})计算时，亏损地幔¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf和¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf分别为0.28325和0.0384^[79]。两阶段Hf模式年龄(T_{DM2})计算时，平均地壳的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf比值为0.015^[80]。

3 结果分析

3.1 碎屑锆石特征

长石杂砂岩样品(D0581-6TW)中锆石，多呈淡玫瑰色、玫瑰色，约5%锆石颜色为深玫瑰色，透明-半透明，其粒径多集中在70~170 μm之间。依据锆石的内部结构和形态将其划分为两类，第一类锆石大多呈自形-半自形，磨圆度差，主要以次棱角状为主(图3(a))，反映搬运距离较短，且这部分锆石多数发育岩浆结晶的韵律环带结构，岩浆成因明显。第二类锆石大多具有较好的磨圆度，自形程度较差，呈圆状、次圆状(图4(b)~(d))，反映经历了较长距离的搬运过程，同时这类锆石中少数锆石发育宽窄不一的增生边和

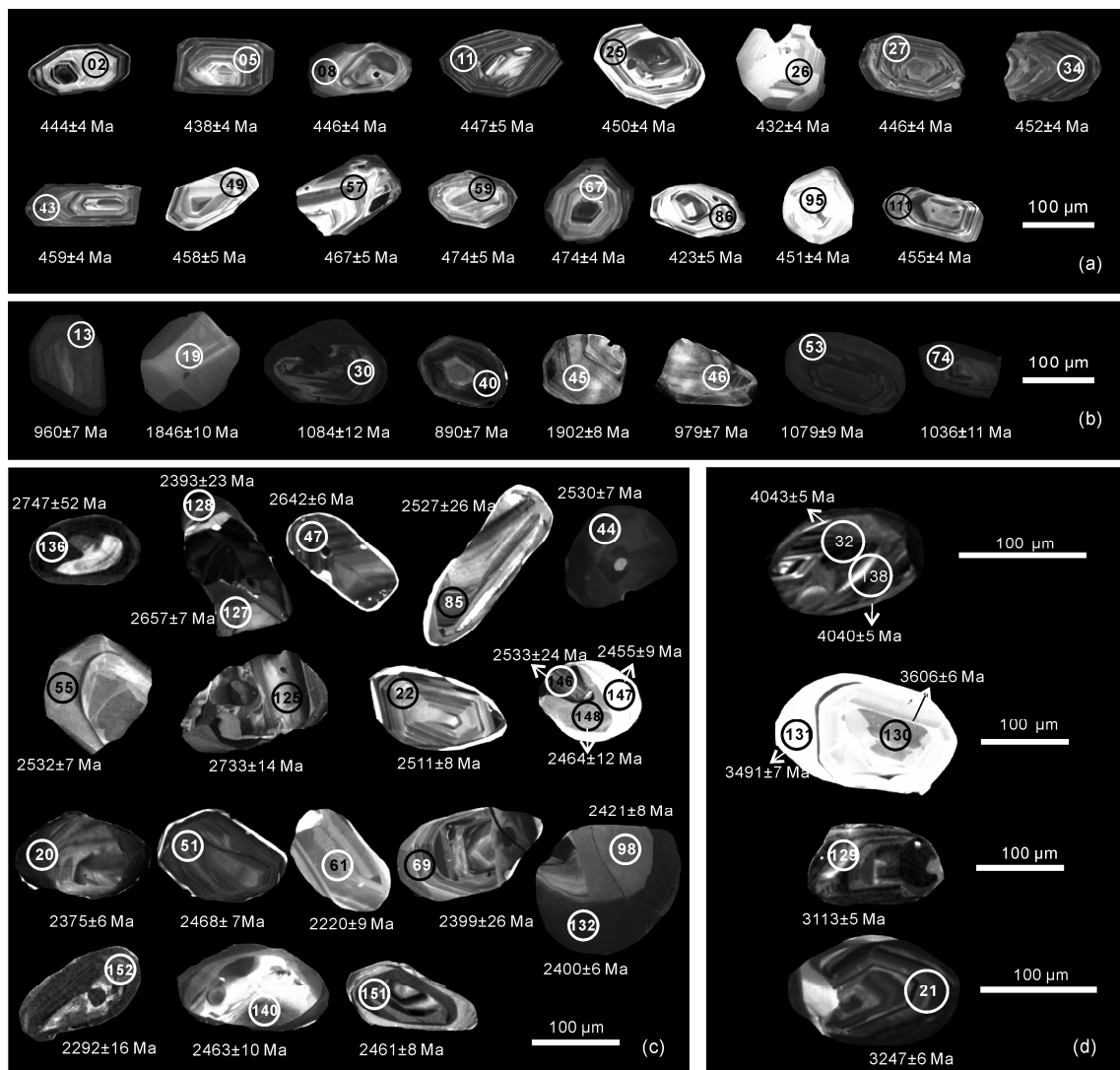


图3 长石杂砂岩代表性碎屑锆石 CL 图像

(a)~(d)分别为年龄<500, 2000~800, 3000~2000 和>3000 Ma 代表性碎屑锆石 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

残留的晶核结构, 呈现锆石在搬运沉积前曾经历过变质作用的改造。

3.2 锆石 U-Pb 年龄

对于碎屑锆石年龄大于 1000 Ma 的数据点, 采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄, 年龄小于 1000 Ma 的数据点, 采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄。对长石杂砂岩样品(D0581-6TW)随机挑选的 148 粒锆石进行了 154 个分析点的测试分析, 获得 135 个单颗粒锆石 141 个有效数据, 样品 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄的分析结果见表 S1, 表中列出了本次所有的测试数据, 测点号 1~119 在中

国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室完成, 而测点号 120~154 西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 其中标注括弧的点号表示为本次统计分析未被采用的数据。

长石杂砂岩(D0581-6TW)样品挑选锆石中存在少量古老碎屑锆石, 最古老的碎屑锆石(32 和 138 为同一粒锆石中两个不同位置的测点) $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 4043 ± 5 和 4040 ± 5 Ma, Th/U 比值分别为 0.42 和 0.21。在 U-Pb 谐和图(图 4(a))中, 该粒锆石中 2 个测点均位于谐和线上(谐和度均为 99%), 显示年龄数据极好的谐和性及可靠性。在透射光显微镜下显示

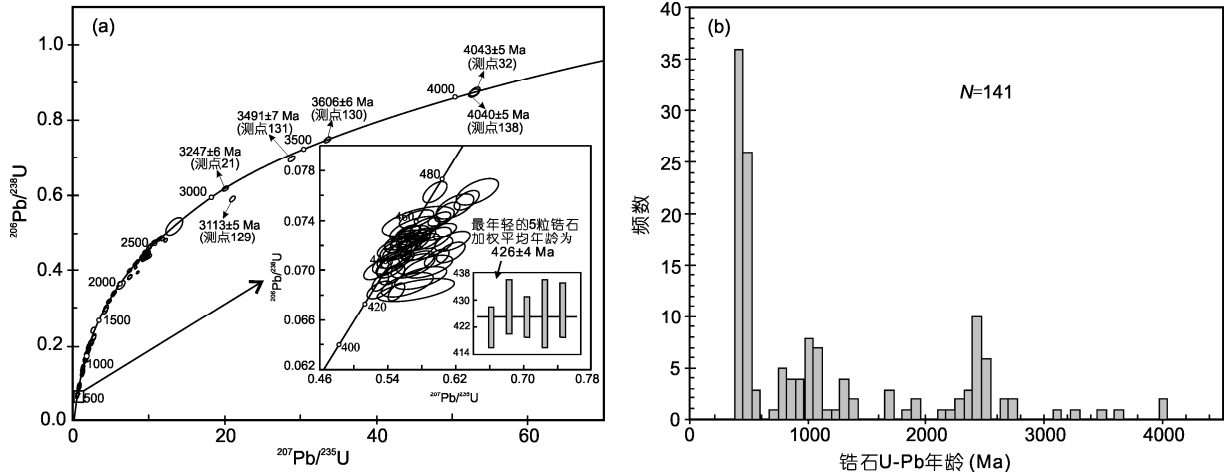


图 4 长石杂砂岩碎屑锆石 U-Pb 谐和图(a)和锆石年龄频率分布图(b)

该粒锆石为深玫瑰色，半透明度，呈浑圆状，为典型的碎屑锆石。CL 图像显示该粒锆石具核-幔-边结构(图 3(d))，其中内核粒径较小，大小约 10~15 μm，并且发育疏而宽的不规则条带；幔部表面略显凹凸不平，略具环带结构、阴极发光强度均一但较弱，结合其 Th/U 比值较高特点，极可能为岩浆成因锆石；边部具窄而无环带和弱阴极发光的特征。本次 2 个测点数据均采集于该颗锆石的幔部，且年龄的谐和性较好，表明该锆石 U-Pb 同位素体系封闭较好，受后期构造改造影响很小，测年数据可靠。

此外，在样品中还获得了 4 组 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 3606±6~3113±5 Ma 的古老碎屑锆石(测点 21, 129, 130 和 131)，这些测点均位于谐和线上或者附近。其中测点 130 和测点 131 为同一粒锆石的核部和边部所测得，CL 图像显示该粒锆石也具核-幔-边结构(图 3(d))，其中内核呈暗灰色，无环带，Th/U 比值较高(1.10)；幔部略具环带结构，显示岩浆成因的特征；边部发育白色和宽窄不均一的增生边，无环带，Th/U 比值较低(0.34)，显示变质成因的特征；核部和边部的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 3606±6 和 3491±7 Ma，可能分别代表了至少两期的构造热事件。测点 21 和测点 129 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 3247±6 和 3113±5 Ma，Th/U 比值均为 0.48，CL 图像显示这两个测点发育岩浆韵律环带(图 3(d))，应为典型的岩浆成因锆石。

锆石 U-Pb 谐和图(图 4(a))和锆石谐和年龄频率分布图(图 4(b))表明，获得的 141 个有效数据主要集中于 2.53~2.37, 1.14~0.89 和 0.47~0.42 Ga 3 个年龄时段，其中 0.47~0.42 Ga 为主年龄集中区，共计有 57

个碎屑锆石 U-Pb 年龄，占总有效数据的 40.4%，其相对峰值年龄为 446 Ma 和最年轻的 5 粒碎屑锆石 U-Pb 年龄为 426±4 Ma，Th/U 比值变化于 0.46~1.33 之间，CL 图像显示大部分的锆石发育清晰的韵律环带(图 3(a))，应为典型的岩浆锆石，这些锆石多次棱角状，属第一类锆石，表明其物源区相对较近且搬运距离较短。1.14~0.89 Ga 年龄集中区，共计有 23 个碎屑锆石 U-Pb 年龄，占总有效数据的 16.3%，没有明显的峰值，这些锆石多为次浑圆状，少数呈圆状，大部分锆石内部发育振荡环带结构，少数锆石边部发育宽窄不一的增生边，Th/U 比值变化于 0.02~1.76 之间(图 2(b))，属第二类锆石。2.53~2.37 Ga 年龄集中区，共计有 19 个碎屑锆石 U-Pb 年龄，占总有效数据的 13.5%，其相对峰值年龄为 2464 Ma，Th/U 比值变化于 0.31~2.33 之间。这些锆石也多为次圆状，少数呈圆状，属第二类锆石，其内部结构又进一步可分为两种类型，一类为内部发育清晰的韵律环带，边部发育窄的变质增生边；另一类岩浆环带不发育，弱阴极发光，结构相对复杂(图 3(c))。

3.3 锆石 Hf 同位素组成

本文对长石杂砂岩(D0581-6TW)样品中的 55 粒碎屑锆石颗粒进行了 55 个点的 LA-MC-ICPMS Lu-Hf 同位素组成分析，其分析结果见表 S2 和图 5(a), (b)。所有锆石均具有低 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 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。对于 0.47~0.42 Ga 的锆石，共计有 24 个测点，其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值变化较大，变化范围为 0.282156~

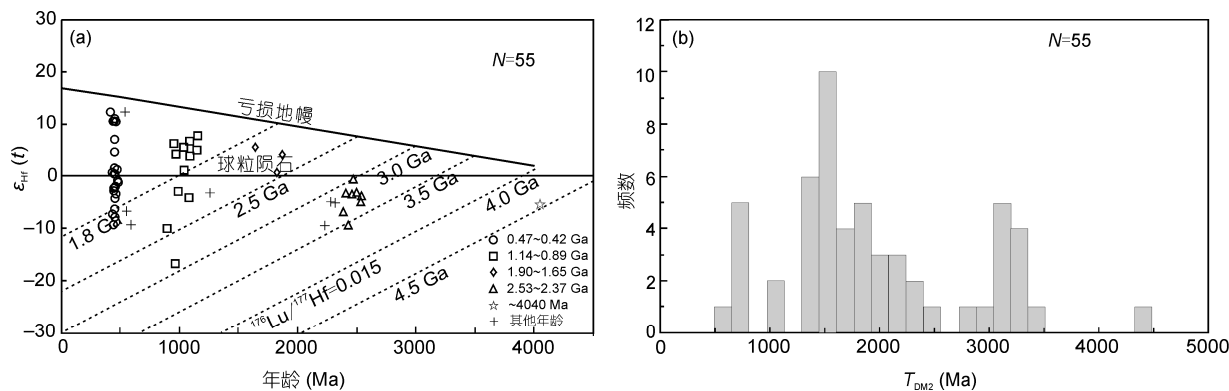


图5 长石杂砂岩碎屑锆石 Hf 同位素组成(a)和 Hf 同位素两阶段模式年龄频率分布直方图(b)

0.282850, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于-9.3~+12.0, 两阶段模式年龄(T_{DM2})为 2011~646 Ma. 对于 1.14~0.89 Ga 的锆石, 共计有 12 个测点, 其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值较低, 变化范围也较小(0.281721~0.282365), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-16.8~+7.8, 两阶段模式年龄(T_{DM2})为 2868~1420 Ma. 对于 2.53~2.37 Ga 的锆石, 共有 8 个测点, 其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值更低且变化范围也较小(0.281104~0.281210), 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值, 介于-7.0~-0.5, 两阶段模式年龄(T_{DM2})为 3513~3009 Ma, 远大于锆石的形成年龄.

另外对于~4040 Ma 的锆石, 仅有一个测点, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.280084, 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为+5.2. 一阶段模式年龄(T_{DM1})和两阶段模式年龄(T_{DM2})分别为 4326 和 4474 Ma. 由于锆石的 Lu/Hf 比值($f_{\text{Lu/Hf}}=-0.92$)显著小于大陆地壳 Lu/Hf 比值($f_{\text{Lu/Hf}}=-0.72^{[81]}$), 因此两阶段模式年龄(T_{DM2})更真实地反映其源区物质从亏损地幔被抽取或其源区物质在地壳的平均存留年龄, 这些特征表明其物源区尚有十分古老(冥古代)的陆壳物质. 对于 1.90~1.65 Ga 年龄段的 3 个测点, 其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值变化于 0.281642~0.281917, 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均呈正值(+0.7~+5.6), 两阶段模式年龄(T_{DM2})为 2455~2011 Ma, 表明它们的原岩起源于新生的陆壳.

4 讨论

4.1 发现~4.0 Ga 碎屑锆石

本文所获得砂岩样品中 141 个有效碎屑锆石 U-Pb 年龄变化范围为 4.04~0.42 Ga. 样品中存在 5 粒 U-Pb 年龄>3.0 Ga 的古老碎屑锆石, 其中最老的 1 粒锆石两个不同位置分析, 数据点都位于谐和线上, 年龄为~4040 Ma. 其余还有 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为

3606±6, 3491±7, 3247±6 和 3113±5 Ma 的古老碎屑锆石. ~4040 Ma 碎屑锆石年龄数据是目前东准噶尔地区乃至中亚地区发现的最古老的地壳物质的年龄记录. 碎屑锆石 Hf 同位素研究表明, ~4040 Ma 的锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.280084, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-5.2, 一阶段模式年龄(T_{DM1})和两阶段模式年龄 (T_{DM2})分别为 4326 和 4474 Ma, 与 Harrison 等人^[82]报道的澳大利亚 Jack Hills 地区 4.01~4.37 Ga 锆石的 Hf 同位素组成存在着相似的特征. Harrison 等人^[82]提出大陆壳在 4.4~4.5 Ga 时就有显著的形成, 但形成后很快就被循环至地幔, 而明显不同于我国华北克拉通和扬子克拉通~3.8 Ga 锆石 Hf 同位素组成, 它们的 Hf 同位素组成与球粒陨石相同, 模式年龄也在 3.8 Ga 前后, 证明他们来自于未经历过显著壳幔分异的地幔源区. 据此, 前人^[14,83]认为华北地区可能不存在更老的地壳岩石记录. 这些>3.0 Ga 的碎屑锆石在最后就位前, 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目前难以确定. 但是, 这些大于 3.0 Ga 尤其是~4040 Ma 数据的出现, 至少说明东准噶尔地体岩石中已经记录到了源自中-古太古代和冥古宙这些古老地壳物质的再循环信息. 值得一提的是 Kröner 等人^[34]曾在中亚造山带哈萨克斯坦境内 Stepnya 地区的早奥陶世闪长玢岩中获得了 1 粒 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 3888±2 Ma 捕获锆石.

4.2 岩块沉积时代及物源分析

东准噶尔阿尔曼泰蛇绿混杂带中沉积岩块的碎屑锆石 U-Pb 年龄测试结果中最年轻的一组碎屑锆石年龄变化于 0.47~0.42 Ga, 主峰值年龄为~446 Ma, 同时在该组年龄数据中相对年轻的 5 粒碎屑锆石加

权平均年龄为 426 ± 4 Ma, 此年龄为样品最新蚀源区年龄, 也限定了该砂岩形成时代的下限, 因此该岩块的沉积时代应为中-晚志留世或者更晚(泥盆纪). 并且这组年轻的碎屑锆石(早古生代)的比例远高于古老的碎屑锆石(早古生代前), 该组碎屑锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-9.3 \sim +12.0$, 两阶段模式年龄(T_{DM2})为 $2011 \sim 646$ Ma, 远大于锆石的形成年龄, 呈现地幔来源和新生地壳的双重特征. 同时这些年轻锆石大多呈自形或半自形, 磨圆度差, 反映搬运距离较短. 而对于 $1.14 \sim 0.89$ Ga 和 $2.53 \sim 2.37$ Ga 这两组相对古老的碎屑锆石, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 $-16.8 \sim +7.8$ 和 $-7.0 \sim +0.5$, 两阶段模式年龄(T_{DM2})分别为 $2868 \sim 1420$ Ma 和 $3513 \sim 3009$ Ma, 并且对于 $2.53 \sim 2.37$ Ga 的碎屑锆石总体具负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的特征, 表明其物源区存在太古代从亏损地幔分离进入地壳的重大地质事件, 即太古代地壳增生事件, 同时这两组的碎屑锆石大多具有较好的磨圆度, 反映其经历了相对较长的搬运过程. 总之上述这些特征表明本次研究的阿尔曼泰蛇绿混杂带中沉积岩块很可能沉积于一个岩浆活动较为激烈的地区, 这一特征与活动陆缘的碎屑沉积极为相似.

近年来, 我们在该区进行的 1:25 万区调修测工作和一些学者先后在东准噶尔地区发现了早古生代岩浆活动的信息, 如我们曾在东准噶尔野马泉一带分别获得了石英闪长岩和英云闪长岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 443 ± 6 和 442 ± 5 Ma(未发表的数据), 张永等人^[84]报道了琼河坝地区花岗斑岩中破碎变形的锆石核年龄为 442 ± 7 Ma, 杜世俊等人^[85]通过锆石 CAMECA U-Pb 测年获得了和尔赛地区钾长花岗岩的年龄为 429 Ma, 但是这些岩石具有高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和相对低的两阶段模式年龄(小于 700 Ma)(图 6(a)), 表明它们对所研究砂岩的物源贡献较小. 在东准噶尔地体南缘的哈尔里克山一带也发现了大量的早古生代的侵入岩, 如哈尔里克山口门子附近的闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 430 ± 6 Ma^[86], 哈尔里克山东段主脊闪长岩和花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 447 ± 11 和 462 ± 9 Ma^[87], 这些岩浆岩被认为是古生代期间向南逐渐迁移的吐哈盆地南缘活动陆缘的一部分, 其形成与康古尔塔格一带洋壳残片代表的洋盆岩石圈板块向北的俯冲有关^[88], 很显然也不能为研究的沉积残块提供物源. 在研究区北侧阿尔泰山南缘地区广泛发育早古生代的花岗岩、同时代的火山岩和片麻岩系^[89-94], 如切木尔切克片麻状花岗岩

SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 462 ± 10 Ma^[90], 冲呼尔盆地火山岩锆石 U-Pb 年龄为 436 ± 4 Ma^[91], 阿巴宫片麻状二云母正长花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 458 ± 3 Ma^[92], 阿尔格达依变辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 439 ± 17 Ma^[93], 克朗盆地铁木尔特黑云母花岗岩锆石年龄为 459 ± 5 Ma^[94]. 近年来的研究表明, 这些早古生代的花岗岩和火山岩为俯冲-同造山的产物, 形成于活动陆缘的构造环境^[90-96], 这些岩石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和两阶段模式年龄与所研究的早古生代碎屑锆石具有很好的吻合性(图 6(b), (c)), 揭示了所研究砂岩样品中早古生代的碎屑锆石可能主要来自北侧的阿尔泰山造山带. 另外该沉积岩块与 Long 等人^[96]报道的研究区北侧阿尔泰山地区中-上奥陶统哈巴河群和前人研究的早古生代的片麻岩在 Hf 同位素组成和碎屑锆石年龄分布模式方面存在相似性(图 6(d), (e)和图 7(a), (b)), 同时也与东准噶尔地区伊吾县境内奥陶系荒草坡群也有着类似的碎屑锆石年龄分布模式(图 7(c)), 因此很可能表明它们具有类似物源区, 而后的物源被认为是来自北侧的阿尔泰山造山带^[53], 这一认识与我们对阿尔曼泰蛇绿混杂带中沉积岩块的碎屑锆石的研究结果完全一致. 但与卡拉麦里蛇绿岩以北的东准噶尔地区晚古生代地层的碎屑锆石年龄谱系存在着显著的差异(图 7(d)), 后者均较缺乏前寒武纪的碎屑锆石年龄信息, 并且物源主要来自于东准噶尔地区古生代岛弧岩浆活动的火山-沉积岩系^[53,99]. 在卡拉麦里蛇绿岩带以南石炭纪砂岩中也有早古生代和前寒武系的碎屑锆石信息(图 7(e)), 但其物源区被认为来自南侧的吐哈盆地和准噶尔盆地所覆盖的地区^[100]. 因此, 在碎屑锆石组成方面揭示本次研究的沉积岩块的物源应来自北侧阿尔泰山造山带, 并且也不属于泥盆纪地层, 考虑到最年轻的碎屑锆石年龄为 426 ± 4 Ma, 应将本次研究的阿尔曼泰蛇绿混杂带中沉积岩块的沉积时代置于晚志留世是合适的.

4.3 对东准噶尔及邻区早古生代构造演化的启示

东准噶尔阿尔曼泰蛇绿混杂带中沉积岩块的碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征指示了其物源来自于北侧的阿尔泰山造山带, 其沉积时代置于晚志留世. 近年来的研究表明, 东准噶尔由一系列的岛弧杂岩带和增生楔杂岩组成, 这些杂岩是在古生代俯冲-增生过程中产生的^[50,51]. 东准噶尔构造单元划分上

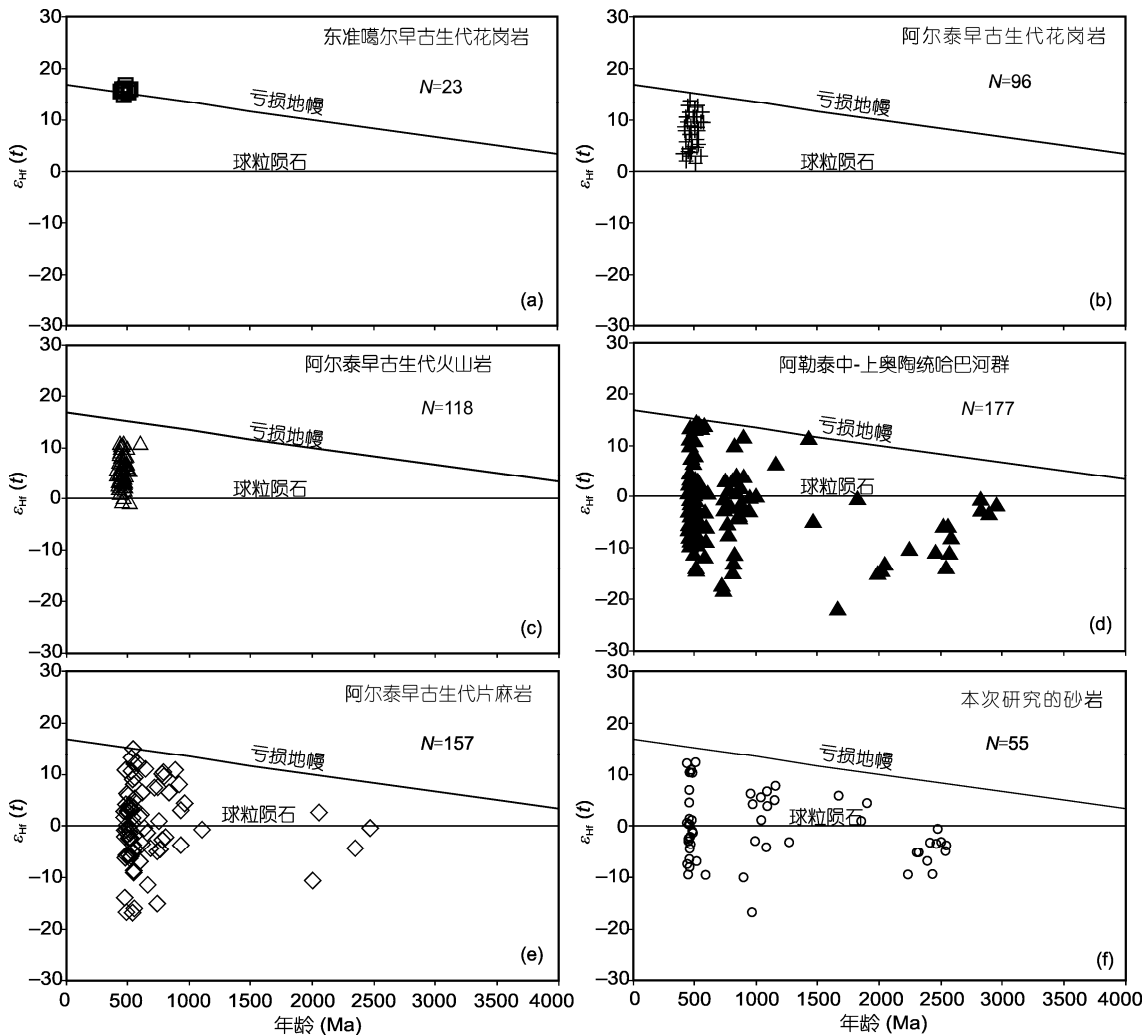


图6 东准噶尔与阿尔泰早古生代火成岩和碎屑岩锆石 Hf 同位素组成对比

资料来源: (a) 张永等人^[84]; (b) 孙敏等人^[52]和 Cai 等人^[97]; (c) Wang 等人^[98]; (d) Long 等人^[96]; (e) Sun 等人^[89]; (f) 本文数据(未包括>3.0 Ga 的数据)

从北向南依次为都拉特复合岛弧、野马泉复合岛弧和将军增生杂岩，它们被两个蛇绿岩带(阿尔曼泰蛇绿岩带和卡拉麦里蛇绿岩带)分开。阿尔曼泰蛇绿岩和卡拉麦里蛇绿岩反映了早-中古生代大洋地壳的形成^[60,101]。而位于阿尔曼泰和额尔齐斯构造带以北的阿尔泰陆块南缘内发育有早古生代的活动陆缘岩浆弧，其锆石 U-Pb 年龄集中于 470~440 Ma 之间^[90,95]，略晚于阿尔曼泰 SSZ 型蛇绿岩的形成时代(505~489 Ma)^[60-62]，本次在东准噶尔北缘结勒德喀拉一带获得石英闪长岩和花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 483±6 和 481±5 Ma (未发表的数据)，具有岛弧岩浆岩的属性，代表了阿尔曼泰蛇绿岩所代表的早古生代大洋向北俯冲最早一期岩浆事件，同时也为其洋

盆的俯冲极性提供了有力的证据。从阿尔泰山到东准噶尔南部，大型断裂构造以向南西的斜冲运动为主，且具有“北老南新”的构造迁移特征^[102,103]；东准噶尔地区的宽频地震探测数据揭示，在卡拉麦里以北、富蕴以南间的地表以下 50 和 100 km 深度存在两条均向北倾的强反射体^[104,105]。并且从卡拉麦里以南到北部的阿尔泰山，Moho 面向北逐渐变深，在 18~28 km 深度下存在高速 P 波异常体，而且该异常体的厚度(10 km)和波速值(7.3 km/s)与洋壳的厚度和波速值相当。在准噶尔盆地东北缘，中志留统-下石炭统下部之间为连续沉积，岩性以陆缘碎屑岩为主，夹有少量碳酸盐岩，具有被动陆缘沉积岩系的特征。

依据上述北部的阿尔泰早古生代活动陆缘弧的

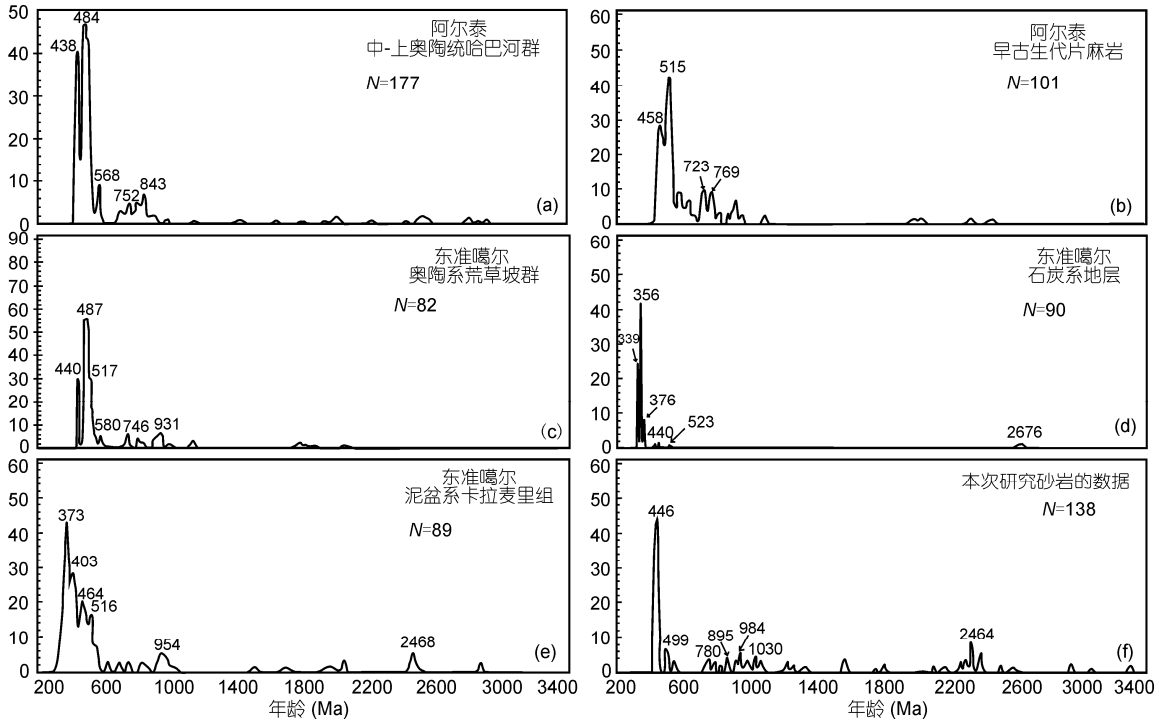


图7 东准噶尔与阿尔泰古生代碎屑锆石年龄谱对比

资料来源: (a) Long 等人^[53]; (b) 孙敏等人^[52]; (c) Long 等人^[96]; (d) 王一剑等人^[99]; (e) 李亚萍等人^[100]; (f) 本文数据(未包括>3.6 Ga 的数据)

发育、中部的东准噶尔地体早奥陶世岛弧岩浆岩、地表构造变形的运动学和深部地球物理特征、以及南部准噶尔盆地东北缘(卡拉麦里蛇绿岩带以南)中志留世-早石炭世之间的被动陆缘连续沉积等特征,可以说明东准噶尔洋盆是自南向北逐渐俯冲-消减的,并且洋盆在俯冲-消减作用过程中,消减带存在自北向南的后退式迁移作用。在早奥陶世-中志留世期间,阿尔曼泰蛇绿岩所代表的早古生代大洋向北俯冲形成阿尔泰古陆南缘活动陆缘岩浆弧;至中-晚志留世,东准噶尔地区局限于西伯利亚地台南缘浅水区的地方性冷水生物群-图瓦贝化石^[106,107]、且具有海相磨拉石特征的中-顶志留统地层与下伏奥陶系火山-沉积地层不整合接触,表明中-晚志留世时东准噶尔早古生代洋盆体系已发生了关闭,并且与西伯利亚古陆联接为一体(但海水尚未完全消退),成为西伯利亚古陆的广阔边缘。使得图瓦贝生物群能够越过西伯利亚南缘,到达东准噶尔(包括卡拉麦里蛇绿岩带以南的地区),那么位于其北部的额尔齐斯-南蒙古晚古生代洋和位于南部的卡拉麦里晚古生代洋盆必是发育在增生了的西伯利亚古陆的内部,也可以说它们是后张开的、发育在陆壳再破裂基础上的次生洋。而

本次在阿尔曼泰蛇绿混杂岩中识辨出的晚志留世沉积岩块,其物源主要为北侧的阿勒泰造山带,进一步揭示了在晚志留世期间东准噶尔北缘与阿勒泰造山带已联为一体,二者共同构成了古西伯利亚古陆南缘的一个边缘造山带,最终为本次研究的阿尔曼泰蛇绿蛇绿混杂带中的沉积残块提供了物源。同时也揭示了阿尔曼泰蛇绿岩所代表的早古生代大洋至少在晚志留世已经关闭,蛇绿岩的侵位已经完成。

5 结论

(1) 利用 LA-(MC)-ICPMS 锆石微区 U-Pb 同位素测年技术,在东准噶尔地区阿尔曼泰蛇绿混杂岩中的沉积岩块获得~4040 Ma 的碎屑锆石年龄。Hf 同位素研究表明,~4040 Ma 的锆石具负的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值和稍大于锆石形成年龄的 Hf 同位素两阶段模式年龄,表明其物源区尚有十分古老(冥古代)的陆壳物质。同时也获得 $3606 \pm 6 \sim 3113 \pm 5$ Ma 的碎屑锆石年龄。目前难以推测这些 >3.0 Ga 的物源,但至少说明东准噶尔地体岩石中已经记录到了源自中太古-古太古代和冥古宙这些古老地壳物质的再循环信息。

(2) 426 ± 4 Ma 为所研究沉积岩块中最年轻的碎

屑锆石年龄,由此限定了地层时代的下限,结合区域地质特征,认为阿尔曼泰蛇绿混杂带中沉积岩块的沉积时代应为晚志留世.

(3) 东准噶尔阿尔曼泰蛇绿混杂带中沉积岩块的碎屑锆石年龄主要存在 2.53~2.37, 1.14~0.89 和 0.47~0.42 Ga 3 个年龄集中区,主峰值年龄为~446

Ma,结合碎屑锆石的形态、内部结构和 Hf 同位素组成等特点,认为其物源可能来自北侧的阿勒泰造山带,同时也暗示了在晚志留世期间阿尔曼泰蛇绿岩所代表的早古生代大洋已经关闭,东准噶尔北缘与阿勒泰造山带已联为一体,二者共同构成了古西伯利亚古陆南缘的一个边缘造山带.

致谢

在野外地质工作过程中得到了中国地质科学院李继亮研究员、西安地质矿产研究所陈隽璐研究员和马仲平研究员的悉心指点;文中锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年测试和解释得到了中国科学院青藏高原研究所岳雅慧副研究员、王厚起博士和李顺博士及中国地质大学(北京)张金玉博士的热情帮助;本文在成稿过程中得到中国地质科学院李锦铎研究员、中国地质大学(北京)王瑜教授、陕西区域地质矿产研究院杨永成高工的建设性意见和建议,在此表示衷心的感谢!

参考文献

- Pell S D, Williams I S, Chivas A R. The use of protolith zircon age fingerprints in determining the protosource areas for some Australian the dune sands. *Sedim Geol*, 1997, 109: 233-360
- Fedo C M, Sircombe K N, Rainbird R H. Detrital zircon analysis of the sedimentary record. *Rev Mineral Geochem*, 2003, 53: 277-303
- Richards A, Argles T, Harris N, et al. Himalayan architecture constrained by isotopic tracers from clastic sediments. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 236: 773-796
- 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 review of the paleogeographical and denudational history of the Yilgarn Craton. *Earth-Sci Rev*, 2005, 68: 245-279
- Veevers J J, Belousova E A, Saeed A, et al. Pan-Gondwanaland detrital zircons from Australia analysed for Hf-isotopes and trace elements reflect an ice-covered Antarctic provenance of 700-500 Ma age, T_{DM} of 2.0-1.0 Ga, and alkaline affinity. *Earth-Sci Rev*, 2006, 76: 135-174
- Wan Y S, Li R W, Wilde S A, et al. UHP metamorphism and exhumation of Dabie Orogen: Evidence from SHRIMP dating of zircon and monazite from a UHP frantic gneiss cobble from the Heifei Basin, China. *Geochim Cosmochim Acta*, 2005, 69: 4333-4348
- Wan Y S, Song T R, Liu D Y, et al. Mesozoic monazite in Neoproterozoic metasediments: Evidence for low-grade metamorphism of Sinian sediments during Triassic continental collision, Liaodong Peninsula, NE China. *Geochem J*, 2007, 41: 47-55
- Wan Y S, Liu D Y, Wang W, et al. Provenance of Mesozoic Neoproterozoic cover sediments at the Ming Tombs, Beijing, North China Craton: An integrated study of U-Pb dating and Hf isotopic measurement of detrital zircons and whole-rock geochemistry. *Gandwana Res*, 2011, 20: 219-242
- Bernet M, Spiedel C. Detrital thermochronology provenance analysis, exhumation, and landscape evolution of mountain belts. *Geol Soc Am Spec Pap*, 2004, 378: 1-126
- Zhou J B, Wilde S A, Zhao G C, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Neoproterozoic Penglai Group and Archean gneisses from the Jiaobei Terrance, North China, and their tectonic implications. *Precambrian Res*, 2008, 160: 323-340
- 陆松年, 李怀坤, 王惠初, 等. 秦-祁-昆造山带元古宙副变质岩层碎屑锆石年龄谱研究. *岩石学报*, 2009, 25: 2195-2208
- Li R W, Wan Y S, Cheng Z Y, et al. Provenance of Jurassic sediments in the Heifei Basin, east-central China and the contribution of high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie Shan. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 231: 279-294
- Zhou J B, Wilde S A, Zhao G C, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Wulian Complex: Defining the boundary between the North and South China Cratons in the Sulu Orogenic Belt, China. *Precambrian Res*, 2008, 162: 559-576
- 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
- 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
- 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
- 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

- 18 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 Archean Earth. *Geochim Cosmochim Acta*, 1997, 61: 2475–2484
- 19 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
- 20 Iizuka T, Horie K, Komiya T, et al. 4.2 Ga zircon xenocryst in Acasta gneiss from northwestern Canada: Evidence for early continental crust. *Geology*, 2006, 34: 245–248
- 21 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
- 22 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
- 23 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
- 24 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
- 25 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
- 26 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
- 27 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
- 28 万渝生, 刘敦一, 董春艳, 等. 中国最老岩石和锆石. *岩石学报*, 2009, 25: 1973–1807
- 29 Gebauer D, Williams I S, Compston W, et al. The development of the Central European Continental crust since the Early Archean based on conventional and ion-microprobe dating of up to 3.84 Ga old detrital zircons. *Tectonophysics*, 1989, 157: 81–96
- 30 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
- 31 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
- 32 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
- 33 Gehrels G E, DeCelles P G, Ojha T P, et al. Geologic and U-Pb geochronologic evidence for early Paleozoic tectonism in the Dardeldhura thrust sheet, far-west Nepal Himalaya. *J Asian Earth Sci*, 2006, 28: 385–408
- 34 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
- 35 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
- 36 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
- 37 Nutman A P, Wan Y S, Du L L, et al. Multistage late Neoproterozoic crustal evolution of the North China Craton, eastern Hebei. *Precambrian Res*, 2011, 189: 43–65
- 38 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
- 39 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
- 40 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 episodic reworking of Archean crust in South China. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 252: 56–71
- 41 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
- 42 第五春荣, 孙勇, 董增产, 等. 北秦岭冥古宙(4.1–3.9 Ga)锆石年代学新进展. *岩石学报*, 2010, 26: 1171–1174
- 43 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
- 44 何世平, 李荣社, 王超, 等. 青藏高原北羌塘昌都地块发现 ~ 4.0 Ga 碎屑锆石. *科学通报*, 2011, 56: 573–582
- 45 Chen B, Jahn B M. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence. *J Asian Earth Sci*, 2004, 23: 691–703
- 46 Coleman R. Continental growth of Northwest China. *Tectonics*, 1989, 8: 621–625
- 47 Şengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Asia. *Nature*, 1993, 364: 299–307

- 48 李锦轶. 新疆东部古元古代晚期和古生代构造格局及其演变. 地质论评, 2004, 50: 304-322
- 49 舒良树, 卢华复, 印栋浩, 等. 新疆北部古生代大陆增生构造. 新疆地质, 2001, 19: 59-63
- 50 Xiao W J, Han C M, Yuan C, et al. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of North Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of Central Asia. *J Asian Earth Sci*, 2008, 32: 102-117
- 51 Xiao W J, Windley B F, Yuan C, et al. Paleozoic multiple subduction-accretion processes of the southern Altaids. *Am J Sci*, 2009, 309: 221-270
- 52 孙敏, 龙小平, 蔡克大, 等. 阿尔泰早古生代末期洋中脊俯冲: 锆石 Hf 同位素组成突变的启示. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 935-948
- 53 Long X P, Yuan C, Sun M. Geochemistry and U-Pb detrital zircon dating of Paleozoic graywackes in East Junggar, NW China: Insights into subduction-accretion processes in the southern Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Res*, 2012, 21: 637-653
- 54 王洪亮, 徐学义, 何世平, 等. 中国天山及邻区 1:100 万地质图. 北京: 地质出版社, 2007
- 55 何国琦, 李茂松, 贾进斗, 等. 中国新疆北部奥陶-志留系岩石组合的古构造、古地理意义. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37: 99-110
- 56 李锦轶. 新疆东准噶尔蛇绿岩的主要特征及其侵位历史. 岩石学报, 1995, 11: 73-84
- 57 牛贺才, 张海洋, 单强, 等. 扎河坝蛇绿混杂岩内富铌玄武(安山)岩的地球化学特征及其地质意义. 岩石学报, 2009, 25: 916-924
- 58 牛贺才, 张海洋, 单强, 等. 扎河坝石榴辉石岩中超硅-超钽石榴子石的发现及其地质意义. 科学通报, 2007, 52: 2169-2174
- 59 牛贺才, 单强, 张海洋, 等. 东准噶尔扎河坝超高压变质成因石英菱镁岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年代学信息及其地质意义. 岩石学报, 2007, 23: 1627-1634
- 60 牛贺才, 单强, 张兵, 等. 东准噶尔扎河坝蛇绿混杂岩中的石榴角闪岩. 岩石学报, 2009, 25: 1484-1491
- 61 简平, 刘敦一, 张旗, 等. 蛇绿岩及蛇绿岩中浅色岩的 SHRIMP U-Pb 测年. 地学前缘, 2003, 10: 439-456
- 62 张元元, 郭召杰. 准噶尔北部蛇绿岩形成时限新证据及其东、西准噶尔蛇绿岩的对比研究. 岩石学报, 2010, 26: 422-430
- 63 肖文交, Windley B F, 阎全人, 等. 北疆地区阿尔曼太蛇绿岩锆石 SHRIMP 年龄及其大地构造意义. 地质学报, 2006, 80: 32-37
- 64 新疆地质矿产局第二区域地质调查大队. 1:5 万加勒帕克依增德幅、塔斯喀克幅区域地质调查报告. 1995
- 65 新疆地质局区域地质测量大队. 1:20 万奥什克山幅区域地质调查报告. 1966
- 66 新疆地质局区域地质测量大队. 1:20 万卡姆斯特幅区域地质调查报告. 1976
- 67 新疆地质局区域地质测量大队. 1:20 万恰库尔特幅区域地质调查报告. 1966
- 68 Sláma J, Košler J, Daniel J, et al. Plešovice zircon-A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chem Geol*, 2008, 249: 1-35
- 69 Li X H, Liu Y, Li Q L, et al. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization. *Geochem Geophys Geosyst*, 2009, 10: Q04010, doi: 10.1029/2009GC002400
- 70 Andersen T. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chem Geol*, 2002, 192: 59-79
- 71 Ludwig K R. Isoplot 3.0-A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochron Cent, Spec Publ, 2003, 4: 70
- 72 Yuan H L, Gao S, Dai M N, et al. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS. *Chem Geol*, 2008, 247: 100-118
- 73 Bievre D P, Taylor P D. Table of the isotopic compositions of the elements. *Int J Mass Spectrom Ion Process*, 1993, 123: 149-166
- 74 Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, et al. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections. *J Anal At Spectrom*, 2002, 17: 1567-1574
- 75 Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chem Geol*, 2006, 234: 105-126
- 76 Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, et al. Trace element and isotopic composition of GJ red zircon standard by laser ablation. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70(Suppl): A158, doi: 10.1016/j.gca.2006.06.1383
- 77 Scherer E, Munker C, Mezger K. Calibration of the lutetium-hafnium clock. *Science*, 2001, 293: 683-687
- 78 Blichert-Toft J, Albarède F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 148: 243-258
- 79 Vervoort J D, Blichert-Toft J. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63: 533-556
- 80 Griffin W L, Pearson N J, Belousova E. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64: 133-147
- 81 Amelin Y, Lee D C, Halliday A N. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. *Nature*, 1999, 399: 252-255
- 82 Harrison T M, Blichert-Toft J, Muller W, et al. Heterogeneous Hadean hafnium: Evidence of continental crust at 4.4 to 4.5 Ga. *Science*, 2005, 310: 1947-1950

- 83 Wu F Y, Zhao G C, Wilde S A, et al. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 2005, 24: 523–545
- 84 张永, 梁广林, 屈迅, 等. 东准噶尔琼河坝岛弧早古生代岩浆活动的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据. *岩石学报*, 2010, 26: 2389–2398
- 85 杜世俊, 屈迅, 邓刚, 等. 东准噶尔和尔赛斑岩铜矿成岩成矿时代与形成的构造背景. *岩石学报*, 2010, 26: 2981–2996
- 86 郭华春, 钟莉, 李丽群. 新疆哈尔里克山口门子地区石英闪长岩年代研究及地质意义. *地质通报*, 2006, 25: 928–931
- 87 曹福根, 涂其军, 张晓梅, 等. 哈尔里克山早古生代岩浆弧的初步确定——来自塔水河一带花岗质岩体锆石 SHRIMP U-Pb 测年的证据. *地质通报*, 2006, 25: 923–927
- 88 李锦轶, 王克卓, 孙桂华, 等. 东天山吐哈盆地南缘古生代活动陆缘残片: 中亚地区古亚洲洋板块俯冲的地质记录. *岩石学报*, 2006, 22: 1087–1102
- 89 Sun M, Yuan C, Xiao W J, et al. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneissic rocks from the Chinese Altai: Progressive accretionary history in the early to middle Paleozoic. *Chem Geol*, 2008, 247: 352–383
- 90 Wang T, Hong D W, Jahn B, et al. Timing, petrogenesis and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen. *J Geol*, 2006, 114: 735–751
- 91 曾乔松, 陈广浩, 王核, 等. 阿尔泰冲呼尔盆地花岗质岩类的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义. *岩石学报*, 2007, 23: 1921–1932
- 92 刘峰, 李延河, 毛景文, 等. 阿尔泰造山带阿巴宫花岗岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义. *地球学报*, 2008, 29: 795–804
- 93 Wong K, Sun M, Zhao G C, et al. Geochemical and geochronological studies of the Alege dayi ophiolitic complex and its implication for the evolution of the Chinese Altai. *Gondwana Res*, 2010, 18: 438–454
- 94 柴凤梅, 董连慧, 杨富全, 等. 阿尔泰南缘克朗盆地铁木尔特花岗岩体年龄、地球化学特征及成因. *岩石学报*, 2010, 26: 377–386
- 95 王涛, 童英, 李舫, 等. 阿尔泰造山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义——以中国阿尔泰为例. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29: 595–618
- 96 Long X P, Yuan C, Sun M. Detrital zircon ages and Hf isotopes of the early Paleozoic flysch sequence in the Chinese Altai, NW China: New constrains on depositional age, provenance and tectonic evolution. *Tectonophysics*, 2010, 480: 213–231
- 97 Cai K D, Sun M, Yuan C, et al. Prolonged magmatism, juvenile nature and tectonic evolution of the Chinese Altai, NW China: Evidence from zircon U-Pb and Hf isotopic study of Paleozoic granitoids. *J Asian Earth Sci*, 2011, 42: 949–968
- 98 Wang Y J, Yuan C, Long X P, et al. Geochemistry, zircon U-Pb ages and Hf isotopes of the Paleozoic volcanic rocks in the northwestern Chinese Altai: Petrogenesis and tectonic implications. *J Asian Earth Sci*, 2011, 42: 969–985
- 99 王一剑, 刘洪军, 周娟萍, 等. 东准噶尔卡姆斯特北海相火山-沉积岩碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及地质意义. *现代地质*, 2011, 25: 1047–1058
- 100 李亚萍, 李锦轶, 孙桂华, 等. 准噶尔盆地基底的探讨: 来自原泥盆纪卡拉麦里组砂岩碎屑锆石的证据. *岩石学报*, 2007, 23: 1577–1590
- 101 黄岗, 牛广智, 王新录, 等. 新疆东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩形成和侵位时限: 来自辉绿岩和凝灰岩的年代学证据. *地质通报*, 2012, 31: 1267–1278
- 102 李锦轶, 何国琦, 徐新, 等. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨. *地质学报*, 2006, 80: 148–167
- 103 姜耀俭, 杨丙中, 王岫岩, 等. 准噶尔盆地东北缘构造特征、演化及与油气的关系. *地质学报*, 2002, 76: 462–468
- 104 李海鸥, 姜枚, 王亚军, 等. 新疆富蕴-库尔勒剖面接收函数方法获得的地壳上地幔结构成像. *地质学报*, 2006, 80: 135–141
- 105 王亚军, 钱荣毅, 姜枚, 等. 新疆富蕴-库尔勒剖面地震层析图像与地壳上地幔的速度结构. *地质学报*, 2006, 80: 142–147
- 106 苏养正. 论图瓦贝 Tuvaella 的时空分布和生态环境. *古生物学报*, 1981, 20: 567–576
- 107 张梓歆, 戎嘉余, 邸巧玲. 新疆巴里坤地区志留纪的大型图瓦贝组合. *古生物学报*, 1983, 22: 278–294

补充材料

表 S1 阿尔曼泰蛇绿混杂带中长石杂砂岩碎屑锆石 LA-ICPMS U-Pb 分析结果

表 S2 阿尔曼泰蛇绿混杂带中长石杂砂岩碎屑锆石 LA-MC-ICPMS Lu-Hf 同位素分析结果

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

表 S1 阿尔曼泰蛇绿混杂带中长石杂砂岩碎屑锆石 LA-ICPMS U-Pb 分析结果

测点 编号	元素含量(ppm)		元素比值 Th/U	同位素比值						年龄(Ma)						谐和度 (%)
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
01	124	256	0.48	0.06752	0.00158	1.32369	0.02879	0.14219	0.00121	854	50	856	13	857	7	100
02	169	278	0.61	0.05893	0.00204	0.57963	0.01933	0.07134	0.00067	564	77	464	12	444	4	105
03	587	669	0.88	0.05656	0.00179	0.55207	0.01680	0.07079	0.00061	474	72	446	11	441	4	101
04	263	253	1.04	0.06481	0.00220	1.10059	0.03580	0.12316	0.00116	768	73	754	17	749	7	101
05	172	211	0.82	0.05567	0.00120	0.53945	0.01086	0.07029	0.00062	439	29	438	7	438	4	100
06	193	365	0.53	0.06202	0.00126	0.63552	0.01198	0.07433	0.00065	675	25	500	7	462	4	108
07	193	135	1.42	0.07286	0.00137	1.59918	0.02786	0.15922	0.00143	1010	21	970	11	952	8	102
08	146	185	0.79	0.05831	0.00132	0.57604	0.01229	0.07166	0.00065	541	31	462	8	446	4	104
09	373	584	0.64	0.05914	0.00233	0.55983	0.02159	0.06867	0.00067	572	67	451	14	428	4	105
10	137	113	1.22	0.06183	0.00179	0.61648	0.01705	0.07233	0.00074	668	42	488	11	450	4	108
11	103	140	0.74	0.06097	0.00192	0.60343	0.01816	0.07179	0.00077	638	46	479	11	447	5	107
12	570	638	0.89	0.06031	0.00160	0.57448	0.01459	0.06910	0.00061	615	39	461	9	431	4	107
13	106	345	0.31	0.07336	0.00097	1.62335	0.01849	0.16052	0.00127	1024	11	979	7	960	7	102
14	333	269	1.24	0.05867	0.00120	0.58243	0.01104	0.07202	0.00063	555	26	466	7	448	4	104
15	525	647	0.81	0.05596	0.00087	0.53251	0.00736	0.06903	0.00055	451	17	433	5	430	3	101
16	183	171	1.07	0.05946	0.00160	0.59572	0.01522	0.07268	0.00071	584	38	475	10	452	4	105
17	231	806	0.29	0.06771	0.00102	1.19036	0.01542	0.12750	0.00099	860	32	796	7	774	6	103
18	285	290	0.98	0.06106	0.00132	0.59724	0.01207	0.07096	0.00064	641	28	475	8	442	4	107
19	104	155	0.67	0.11286	0.00146	5.30999	0.05932	0.34130	0.00285	1846	10	1870	10	1893	14	98
20	253	274	0.92	0.15258	0.00161	8.63814	0.07213	0.41069	0.00319	2375	6	2301	8	2218	15	107
21	127	265	0.48	0.25997	0.00264	21.26805	0.16871	0.59346	0.00464	3247	6	3151	8	3003	19	108
22	210	109	1.93	0.16534	0.00204	10.04548	0.10618	0.44073	0.00379	2511	8	2439	10	2354	17	107
23	217	359	0.60	0.06080	0.00108	0.59731	0.00971	0.07127	0.00060	632	21	476	6	444	4	107
24	84	407	0.21	0.07760	0.00109	1.98512	0.02329	0.18554	0.00144	1137	29	1110	8	1097	8	104
25	236	230	1.03	0.05795	0.00122	0.57705	0.01139	0.07224	0.00064	528	28	463	7	450	4	103
26	789	728	1.08	0.05957	0.00195	0.56943	0.01792	0.06933	0.00063	588	73	458	12	432	4	106
27	189	278	0.68	0.05572	0.00109	0.54991	0.00998	0.07160	0.00061	441	25	445	7	446	4	100
28 ^{a)}	180	202	0.89	0.09279	0.00199	0.93857	0.01859	0.07338	0.00071	1484	23	672	10	456	4	147
29	681	665	1.02	0.06005	0.00128	0.55016	0.01105	0.06646	0.00055	605	29	445	7	445	3	100
30	875	496	1.77	0.07558	0.00102	1.80127	0.02120	0.17289	0.00139	1084	12	1046	8	1028	8	105
31	91	112	0.81	0.05658	0.00253	0.57163	0.02485	0.07328	0.00078	475	102	459	16	456	5	101
32	154	362	0.42	0.43757	0.00425	53.02645	0.39295	0.87911	0.00672	4043	5	4051	7	4066	23	99
33	172	410	0.42	0.07525	0.00092	1.75629	0.01810	0.16932	0.00133	1075	10	1029	7	1008	7	107
34	336	503	0.67	0.05721	0.00156	0.57299	0.01481	0.07264	0.00063	500	61	460	10	452	4	102
35	458	461	0.99	0.06020	0.00198	0.58167	0.01862	0.07009	0.00064	611	53	466	12	437	4	107
36 ^{a)}	370	1050	0.35	0.17014	0.00175	7.22516	0.05788	0.30807	0.00237	2559	6	2140	7	1731	12	148
37	190	164	1.15	0.05910	0.00150	0.59657	0.01444	0.07323	0.00068	571	36	475	9	456	4	104
38	68	119	0.57	0.08927	0.00158	2.74830	0.04473	0.22333	0.00206	1410	17	1342	12	1299	11	109
39	381	645	0.59	0.07183	0.00084	1.59071	0.01535	0.16066	0.00124	981	9	967	6	960	7	101

(续表 S1)

测点 编号	元素含量(ppm)		元素比值 Th/U	同位素比值						年龄(Ma)						谐和度 (%)
	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	
40	39	517	0.08	0.07480	0.00091	1.52708	0.01568	0.14810	0.00116	1063	10	941	6	890	7	106
41	275	316	0.87	0.05866	0.00112	0.58168	0.01028	0.07193	0.00062	555	24	466	7	448	4	104
42	58	53	1.10	0.07114	0.00232	1.31062	0.04112	0.13365	0.00160	961	44	850	18	809	9	105
43	160	206	0.77	0.05872	0.00152	0.59736	0.01472	0.07381	0.00072	557	37	476	9	459	4	104
44	286	123	2.33	0.16722	0.00190	11.35925	0.10828	0.49281	0.00409	2530	7	2553	9	2583	18	98
45	85	167	0.51	0.11639	0.00140	5.42452	0.05514	0.33811	0.00276	1902	8	1889	9	1878	13	101
46	171	335	0.51	0.07254	0.00099	1.64028	0.01950	0.16406	0.00133	1001	12	986	7	979	7	101
47	128	258	0.50	0.17881	0.00186	12.07034	0.10031	0.48971	0.00386	2642	6	2610	8	2569	17	103
48	516	92	5.58	0.07326	0.00196	1.37140	0.03500	0.13581	0.00146	1021	34	877	15	821	8	107
49	214	173	1.24	0.06177	0.00201	0.62754	0.01956	0.07371	0.00081	666	48	495	12	458	5	108
50	84	95	0.89	0.05648	0.00350	0.57578	0.03487	0.07394	0.00097	471	141	462	22	460	6	100
51	133	294	0.45	0.16115	0.00172	9.63400	0.08314	0.43372	0.00345	2468	7	2400	8	2322	16	106
52	415	357	1.16	0.06016	0.00308	0.57505	0.02901	0.06935	0.00073	609	91	461	19	432	4	107
53	121	610	0.20	0.07539	0.00087	1.90456	0.01831	0.18329	0.00143	1079	9	1083	6	1085	8	100
54	425	529	0.80	0.06235	0.00149	0.61362	0.01383	0.07140	0.00068	686	32	486	9	445	4	109
55	80	142	0.57	0.16348	0.00182	10.97714	0.10131	0.48716	0.00399	2532	7	2521	9	2558	17	99
56	230	213	1.08	0.10225	0.00128	4.12274	0.04449	0.29254	0.00241	1665	9	1659	9	1654	12	101
57	65	120	0.54	0.05989	0.00187	0.61971	0.01853	0.07508	0.00081	600	46	490	12	467	5	105
58	73	82	0.89	0.06256	0.00258	0.70013	0.02789	0.08120	0.00107	693	62	539	17	503	6	107
59	117	103	1.14	0.06139	0.00205	0.64513	0.02072	0.07624	0.00086	653	49	505	13	474	5	107
60 ^{a)}	1202	1464	0.82	0.07853	0.00444	0.55377	0.03076	0.05114	0.00052	1160	115	447	20	322	3	139
61	95	115	0.83	0.13942	0.00175	7.73343	0.08442	0.40245	0.00347	2220	9	2200	10	2180	16	102
62	88	132	0.67	0.05891	0.00172	0.65429	0.01832	0.08058	0.00084	564	43	511	11	500	5	102
63	515	648	0.79	0.05905	0.00145	0.57422	0.01343	0.07055	0.00064	569	35	461	9	439	4	105
64 ^{a)}	564	665	0.85	0.08711	0.00125	2.02851	0.02577	0.16895	0.00142	1363	12	1125	9	1006	8	135
65	112	183	0.61	0.07182	0.00132	1.62838	0.02777	0.16451	0.00148	981	20	981	11	982	8	100
66	81	62	1.30	0.08376	0.00172	2.39213	0.04599	0.20720	0.00204	1287	22	1240	14	1214	11	106
67	275	262	1.05	0.05670	0.00119	0.59598	0.01170	0.07627	0.00068	480	28	475	7	474	4	100
68	60	128	0.47	0.07402	0.00131	1.75937	0.02854	0.17246	0.00154	1042	19	1031	11	1026	8	102
69	123	212	0.58	0.15476	0.00232	9.16584	0.11315	0.42956	0.00366	2399	26	2355	11	2304	16	104
70	654	976	0.67	0.07421	0.00139	1.52998	0.02684	0.14958	0.00124	1047	22	942	11	899	7	105
71	31	61	0.52	0.08864	0.00223	2.68105	0.06438	0.21945	0.00249	1396	29	1323	18	1279	13	109
72 ^{a)}	2998	1736	1.73	0.13253	0.00625	0.86441	0.03932	0.04730	0.00058	2132	85	633	21	298	4	212
73	209	225	0.93	0.10158	0.00123	4.23871	0.04380	0.30278	0.00247	1653	9	1682	8	1705	12	97
74	94	384	0.25	0.07381	0.00095	1.80244	0.02004	0.17718	0.00143	1036	11	1046	7	1052	8	98
75	141	194	0.73	0.08351	0.00120	2.78844	0.03581	0.24228	0.00206	1281	13	1352	10	1399	11	92
76	164	177	0.93	0.05768	0.00150	0.58364	0.01448	0.07342	0.00072	518	37	467	9	457	4	102
77	302	289	1.05	0.07674	0.00103	2.05747	0.02424	0.19455	0.00159	1114	12	1135	8	1146	9	97
78	208	169	1.23	0.05942	0.00269	0.77788	0.03432	0.09500	0.00118	583	74	584	20	585	7	100

(续表 S1)

测点 编号	元素含量(ppm)		元素比值 Th/U	同位素比值						年龄(Ma)						谐和度 (%)
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
79	483	406	1.19	0.06065	0.00116	0.63209	0.01119	0.07562	0.00066	627	23	497	7	470	4	106
80	109	155	0.71	0.10142	0.00155	4.07656	0.05647	0.29168	0.00263	1650	13	1650	11	1650	13	100
81	157	278	0.56	0.05923	0.00164	0.60745	0.01609	0.07442	0.00076	576	40	482	10	463	5	104
82	688	626	1.10	0.05898	0.00232	0.59314	0.02284	0.07297	0.00069	566	67	473	15	454	4	104
83	163	256	0.64	0.14683	0.00190	7.78867	0.08955	0.38491	0.00343	2309	9	2207	10	2099	16	110
84	144	224	0.64	0.05638	0.00184	0.55577	0.01733	0.07149	0.00067	467	74	449	11	445	4	101
85	92	205	0.45	0.16693	0.00254	10.06473	0.12432	0.43729	0.00390	2527	26	2441	11	2338	17	108
86	318	529	0.60	0.05832	0.00271	0.56649	0.02581	0.07048	0.00080	542	80	456	17	439	5	104
87 ^{a)}	638	674	0.95	0.07402	0.00389	0.69140	0.03553	0.06774	0.00076	1042	109	534	21	423	5	126
88	46	39	1.18	0.16410	0.00243	10.80015	0.14833	0.47751	0.00484	2498	11	2506	13	2516	21	99
89	82	161	0.51	0.05646	0.00188	0.56579	0.01826	0.07271	0.00074	471	53	455	12	452	4	101
90	193	172	1.13	0.05930	0.00265	0.58602	0.02554	0.07170	0.00086	578	74	468	16	446	5	105
91	290	244	1.19	0.16109	0.00165	10.79226	0.08927	0.48605	0.00386	2467	6	2505	8	2554	17	97
92	382	396	0.96	0.05898	0.00123	0.58271	0.01142	0.07167	0.00064	566	27	466	7	446	4	104
93	186	145	1.28	0.05843	0.00191	0.56577	0.01776	0.07025	0.00077	546	49	455	12	438	5	104
94	390	554	0.70	0.06297	0.00157	0.62658	0.01483	0.07218	0.00068	707	34	494	9	449	4	110
95	190	277	0.68	0.05777	0.00141	0.57723	0.01333	0.07249	0.00069	521	34	463	9	451	4	103
96	134	295	0.46	0.05564	0.00191	0.55034	0.01814	0.07174	0.00070	438	78	445	12	447	4	100
97 ^{a)}	981	1424	0.69	0.11499	0.00188	1.25764	0.01773	0.07932	0.00066	1880	30	827	8	492	4	168
98	120	132	0.91	0.15676	0.00187	9.86374	0.10196	0.45646	0.00394	2421	8	2422	10	2424	17	100
99	360	664	0.54	0.15811	0.00155	10.14146	0.07785	0.46529	0.00359	2436	6	2448	7	2463	16	99
100	182	141	1.29	0.05913	0.00182	0.57478	0.01696	0.07051	0.00075	572	46	461	11	439	5	105
101	395	485	0.81	0.05856	0.00098	0.55074	0.00840	0.06822	0.00057	551	19	445	6	425	3	105
102	98	255	0.38	0.05940	0.00224	0.74077	0.02731	0.09046	0.00088	582	63	563	16	558	5	101
103	92	125	0.74	0.06239	0.00284	0.60230	0.02660	0.07002	0.00096	688	71	479	17	436	6	110
104	256	218	1.18	0.05455	0.00116	0.52634	0.01048	0.06999	0.00062	394	29	429	7	436	4	98
105	227	242	0.94	0.07520	0.00181	1.34635	0.03064	0.12987	0.00133	1074	29	866	13	787	8	110
106	771	728	1.06	0.05951	0.00130	0.55505	0.01157	0.06765	0.00055	586	31	448	8	422	3	106
107	78	190	0.41	0.08523	0.00124	2.59285	0.03367	0.22067	0.00188	1321	13	1299	10	1285	10	103
108	232	210	1.11	0.05671	0.00128	0.54452	0.01162	0.06964	0.00064	480	31	441	8	434	4	102
109 ^{a)}	848	1684	0.50	0.10799	0.00252	1.64009	0.03529	0.11015	0.00100	1766	44	986	14	674	6	146
110	120	142	0.85	0.05606	0.00142	0.54262	0.01306	0.07021	0.00067	455	36	440	9	437	4	101
111	228	497	0.46	0.05956	0.00095	0.60026	0.00868	0.07310	0.00060	588	18	477	6	455	4	105
112	194	252	0.77	0.05990	0.00162	0.56621	0.01458	0.06856	0.00069	600	38	456	9	427	4	107
113	71	83	0.85	0.06692	0.00173	1.19030	0.02937	0.12900	0.00132	835	34	796	14	782	8	102
114	829	624	1.33	0.06005	0.00288	0.58326	0.02759	0.07044	0.00065	605	87	467	18	439	4	106
115	87	258	0.34	0.11654	0.00249	5.21950	0.09942	0.32483	0.00315	1904	39	1856	16	1813	15	105
116 ^{a)}	2334	1584	1.47	0.13018	0.00431	0.96749	0.03041	0.05390	0.00056	2100	60	687	16	338	3	203
117	160	260	0.61	0.06077	0.00409	0.57308	0.03816	0.06839	0.00082	631	124	460	25	426	5	108

(续表 S1)

测点 编号	元素含量(ppm)		元素比值 Th/U	同位素比值						年龄(Ma)						谐和度 (%)
	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	
118 ^{a)}	1851	1840	1.01	0.26021	0.00264	11.79089	0.09429	0.32862	0.00259	3248	6	2588	7	1832	13	141
119 ^{a)}	447	530	0.84	0.16276	0.00165	8.96043	0.07210	0.39926	0.00310	2485	6	2334	7	2166	14	115
120	122	188	0.65	0.05783	0.00167	0.66650	0.01800	0.08357	0.00074	523	44	519	11	517	4	100
121	205	449	0.46	0.07498	0.00095	1.82394	0.01724	0.17641	0.00108	1068	25	1054	6	1047	6	101
122 ^{a)}	703	732	0.96	0.09431	0.00103	0.88513	0.00820	0.06807	0.00040	1514	21	644	4	425	2	152
123	67	132	0.51	0.05881	0.00142	0.64958	0.01439	0.08010	0.00063	560	34	508	9	497	4	98
124	42	114	0.37	0.07566	0.00128	1.89739	0.02758	0.18187	0.00129	1086	18	1080	10	1077	7	100
125	155	265	0.58	0.18898	0.00161	12.54532	0.07958	0.48146	0.00273	2733	14	2646	6	2534	12	104
126	200	375	0.53	0.05887	0.00123	0.60291	0.01135	0.07428	0.00054	835	45	479	7	462	4	96
127	105	181	0.58	0.18050	0.00215	12.67319	0.10942	0.50919	0.00343	2657	7	2656	8	2653	15	100
128	95	308	0.31	0.15416	0.00384	9.53248	0.22893	0.44843	0.00619	2393	23	2391	22	2388	28	100
129	224	462	0.48	0.23891	0.00257	20.42811	0.14196	0.62011	0.00386	3113	5	3112	7	3110	15	100
130	110	100	1.10	0.32758	0.00374	33.86259	0.27663	0.74966	0.00537	3606	6	3606	8	3606	20	100
131	12	37	0.34	0.30414	0.00374	29.19289	0.27609	0.69611	0.00548	3491	7	3460	9	3406	21	102
132	134	199	0.67	0.15485	0.00174	10.03890	0.07591	0.47016	0.00292	2400	6	2438	7	2484	13	98
133	22	897	0.02	0.07073	0.00098	1.45519	0.01597	0.14920	0.00094	950	13	912	7	896	5	98
134	104	461	0.23	0.07284	0.00122	1.70007	0.02435	0.16926	0.00114	1010	18	1009	9	1008	6	100
135	132	302	0.44	0.15976	0.00171	10.54255	0.07187	0.47857	0.00286	2453	5	2484	6	2521	12	99
136	49	822	0.06	0.19061	0.01077	13.67491	0.81706	0.52030	0.01932	2747	52	2727	57	2700	82	101
137	111	171	0.65	0.08234	0.00313	2.35788	0.08590	0.20768	0.00281	1254	50	1230	26	1216	15	101
138	59	284	0.21	0.43660	0.00477	53.35828	0.40365	0.88634	0.00621	4040	5	4057	8	4091	21	99
139	328	272	1.20	0.07334	0.00103	1.84776	0.02062	0.18273	0.00117	1023	13	1063	7	1082	6	98
140	115	168	0.69	0.16067	0.00225	10.34825	0.11731	0.46710	0.00359	2463	10	2466	10	2471	16	100
141	45	76	0.59	0.13419	0.00818	6.77089	0.40558	0.36595	0.01051	2154	65	2082	53	2010	50	104
142	138	174	0.80	0.05646	0.00133	0.62640	0.01356	0.08046	0.00062	471	34	494	8	499	4	101
143	184	355	0.52	0.06945	0.00097	1.58320	0.01763	0.16533	0.00105	912	13	964	7	986	6	98
144 ^{a)}	154	624	0.25	0.09412	0.00110	1.68565	0.01408	0.12989	0.00105	1511	22	1003	5	787	6	127
145	20	160	0.12	0.06053	0.00141	0.71544	0.01524	0.08572	0.00067	623	32	548	9	530	4	97
146	148	217	0.68	0.16749	0.00239	10.37326	0.11000	0.44918	0.00428	2533	24	2469	10	2392	19	103
147	138	149	0.92	0.15992	0.00210	10.22350	0.10522	0.46366	0.00336	2455	9	2455	10	2456	15	100
148	57	65	0.88	0.16082	0.00251	10.31866	0.13777	0.46533	0.00399	2464	12	2464	12	2463	18	100
149	85	192	0.44	0.07273	0.00196	1.70493	0.04295	0.17002	0.00162	1006	36	1010	16	1012	9	100
150	72	484	0.15	0.07648	0.00110	1.96790	0.02277	0.18662	0.00122	1108	13	1105	8	1103	7	100
151	159	327	0.49	0.16049	0.00208	10.30074	0.10390	0.46548	0.00334	2461	8	2462	9	2464	15	100
152	77	846	0.09	0.14533	0.00266	8.59043	0.14190	0.42870	0.00415	2292	16	2296	15	2300	19	100
153	306	764	0.40	0.08474	0.00265	2.61642	0.07769	0.22393	0.00258	1310	40	1305	22	1303	14	100
154	121	206	0.59	0.07282	0.00138	1.71574	0.02887	0.17088	0.00128	1009	22	1014	11	1017	7	100

a) 表示为本次统计分析未被采用的数据

表 S2 阿尔曼泰蛇绿混杂带中长石杂砂岩碎屑锆石 LA-MC-ICPMS Lu-Hf 同位素分析结果

测点编号	年龄(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$T_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
01	463	0.016290	0.000644	0.282522	0.000010	0.282516	-8.8	1.2	1023	1366	-0.98
05	439	0.011286	0.000460	0.282239	0.000011	0.282235	-18.8	-9.3	1409	2011	-0.99
11	447	0.021350	0.000937	0.282320	0.000010	0.282312	-16.0	-6.4	1313	1834	-0.97
13	960	0.019839	0.000770	0.282304	0.000012	0.282290	-16.6	4.2	1330	1555	-0.98
14	448	0.051446	0.001988	0.282524	0.000012	0.282507	-8.8	0.5	1057	1396	-0.94
15	430	0.035498	0.001325	0.282535	0.000012	0.282524	-8.4	0.7	1023	1370	-0.96
16	452	0.010976	0.000412	0.282436	0.000010	0.282433	-11.9	-2.1	1136	1562	-0.99
18	442	0.014175	0.000697	0.282425	0.000014	0.282419	-12.3	-2.7	1159	1598	-0.98
19	1846	0.011751	0.000420	0.281642	0.000010	0.281627	-40.0	0.7	2221	2455	-0.99
20	2375	0.019902	0.000748	0.281104	0.000018	0.281070	-59.0	-7.0	2969	3331	-0.98
24	1137	0.025021	0.000967	0.282219	0.000012	0.282198	-19.6	4.9	1455	1646	-0.97
25	450	0.012537	0.000487	0.282444	0.000010	0.282440	-11.6	-1.8	1127	1546	-0.99
27	446	0.011233	0.000529	0.282543	0.000012	0.282539	-8.1	1.6	991	1328	-0.98
30	1084	0.060137	0.002272	0.282247	0.000018	0.282201	-18.6	3.8	1467	1675	-0.93
32	4043	0.018943	0.000758	0.280084	0.000012	0.280025	-95.1	-5.2	4326	4497	-0.98
33	1075	0.028497	0.001054	0.282003	0.000013	0.281982	-27.2	-4.2	1759	2167	-0.97
34	452	0.015606	0.000700	0.282398	0.000015	0.282392	-13.2	-3.5	1197	1652	-0.98
39	960	0.037159	0.001303	0.281721	0.000028	0.281697	-37.2	-16.8	2163	2868	-0.96
40	890	0.018719	0.000697	0.281941	0.000012	0.281929	-29.4	-10.1	1828	2401	-0.98
41	448	0.016600	0.000592	0.282697	0.000018	0.282692	-2.7	7.0	778	981	-0.98
43	459	0.015262	0.000630	0.282787	0.000010	0.282782	0.5	10.5	653	771	-0.98
44	2530	0.022147	0.000802	0.281093	0.000014	0.281054	-59.4	-4.0	2988	3266	-0.98
45	1902	0.034392	0.001280	0.281737	0.000012	0.281691	-36.6	4.2	2140	2279	-0.96
51	2468	0.009154	0.000402	0.281210	0.000010	0.281191	-55.2	-0.5	2801	3009	-0.99
52	432	0.027166	0.001061	0.282302	0.000014	0.282293	-16.6	-7.4	1343	1886	-0.97
53	1079	0.020877	0.000834	0.282300	0.000010	0.282283	-16.7	6.6	1338	1494	-0.97
55	2492	0.004332	0.000168	0.281106	0.000010	0.281098	-58.9	-3.3	2922	3195	-0.99
56	1665	0.024861	0.001125	0.281917	0.000012	0.281882	-30.2	5.6	1882	2011	-0.97
58	503	0.025402	0.001003	0.282280	0.000011	0.282271	-17.4	-6.7	1372	1891	-0.97

(续表 S2)

测点编号	年龄(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$T_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
59	474	0.013981	0.000574	0.282777	0.000010	0.282772	0.2	10.4	666	784	-0.98
66	2220	0.004843	0.000191	0.281105	0.000008	0.281097	-59.0	-9.6	2926	3372	-0.99
67	475	0.021502	0.000871	0.282450	0.000017	0.282442	-11.4	-1.2	1130	1525	-0.97
68	1042	0.016679	0.000642	0.282163	0.000012	0.282150	-21.5	1.1	1520	1814	-0.98
69	2399	0.012587	0.000490	0.281176	0.000010	0.281154	-56.4	-3.5	2853	3134	-0.99
74	1036	0.021580	0.000819	0.282292	0.000012	0.282276	-17.0	5.4	1348	1538	-0.98
76	457	0.013186	0.000566	0.282797	0.000012	0.282792	0.9	10.8	638	749	-0.98
77	1146	0.039358	0.001468	0.282305	0.000012	0.282273	-16.5	7.8	1353	1473	-0.96
78	585	0.029492	0.001086	0.282156	0.000012	0.282144	-21.8	-9.3	1548	2120	-0.97
79	470	0.015309	0.000640	0.282461	0.000010	0.282455	-11.0	-0.9	1108	1499	-0.98
83	2309	0.009402	0.000391	0.281181	0.000010	0.281164	-56.3	-5.2	2839	3170	-0.99
84	445	0.011363	0.000422	0.282278	0.000012	0.282274	-17.5	-7.8	1354	1920	-0.99
85	2527	0.018452	0.000702	0.281062	0.000012	0.281028	-60.5	-5.0	3022	3324	-0.98
92	446	0.020796	0.000834	0.282632	0.000014	0.282625	-5.0	4.6	874	1133	-0.97
92	446	0.012574	0.000531	0.282382	0.000010	0.282378	-13.8	-4.1	1214	1689	-0.98
95	451	0.011542	0.000528	0.282791	0.000009	0.282787	0.7	10.5	645	765	-0.98
98	2421	0.015720	0.000580	0.280999	0.000008	0.280972	-62.7	-9.4	3097	3513	-0.98
100	439	0.029437	0.001221	0.282444	0.000011	0.282434	-11.6	-2.3	1149	1567	-0.96
110	437	0.017607	0.000798	0.282516	0.000016	0.282509	-9.1	0.3	1035	1399	-0.98
112	427	0.014330	0.000498	0.282850	0.000009	0.282846	2.8	12.0	562	646	-0.99
133	950	0.016500	0.000667	0.282365	0.000010	0.282353	-14.4	6.2	1242	1420	-0.98
137	1254	0.023008	0.000823	0.281911	0.000010	0.281892	-30.4	-3.3	1875	2252	-0.98
142	499	0.024117	0.000957	0.282817	0.000014	0.282808	1.6	12.3	616	686	-0.97
143	986	0.016912	0.000617	0.282087	0.000010	0.282076	-24.2	-2.8	1624	2016	-0.98
152	2292	0.014986	0.000542	0.281201	0.000010	0.281177	-55.6	-5.1	2823	3151	-0.98
153	2453	0.016301	0.000627	0.281146	0.000012	0.281117	-57.5	-3.5	2903	3180	-0.98