

柴达木盆地北缘乌兰县牦牛山组碎屑锆石 U-Pb 定年及其地质意义^①

冯 乔¹ 秦 宇¹ 付锁堂³ 柳益群² 周鼎武¹ 马达德³
王立群³ 任军虎² 王晨瑜¹

(1. 山东科技大学地球科学与工程学院 山东青岛 266590; 2. 大陆动力学国家重点实验室 西北大学地质系 西安 710069;
3. 中国石油青海油田分公司 甘肃敦煌 736202)

摘 要 应用 LA-ICP-MS 单颗粒锆石 U-Pb 定年方法,对柴达木盆地北缘乌兰县上泥盆统牦牛山组两组砂岩样品开展了碎屑锆石 U-Pb 年代学研究。测年结果显示年龄值分布较宽,可以划分为 5 个峰值年龄区间。在这些碎屑锆石中,最小的年龄为 407.9 Ma,属于岩浆成因,限定了该套地层的沉积下限,为不早于早泥盆世末期,结合区域地质与古生物资料,该套地层为晚泥盆世。碎屑锆石的年龄分布表明本区可能存在五期区域性地质构造事件,其中早古生代最为突出,其次为新元古代和古元古代早期—新太古代晚期,暗示这三期岩浆活动和变质作用较为活跃,并为本套地层提供了主要的锆石来源,具有多时代混合物源特征。样品中少量太古代碎屑锆石的谐和度较好,为研究区附近可能存在太古宙古老地层提供了一定证据,但仍需进一步研究。

关键词 碎屑锆石 U-Pb 定年 构造事件 晚泥盆世 牦牛山组 柴达木盆地北缘

第一作者简介 冯 乔 男 1963 年出生 博士 教授 油气地质、盆地分析与地球化学 E-mail: fengqiao999@126.com

中图分类号 P597⁺.3 **文献标识码** A

0 引言

陆源碎屑沉积物是源区岩石的天然混合物,保存了源区的重要信息,可以为揭示盆地沉积、区域构造、地壳演化及古大陆再造等提供证据,对碎屑沉积物中的锆石进行研究可以追溯地球的早期演化历史。由于 LA-ICP-MS 等测龄方法数据精度高^[1],可以提供物源形成的准确时代,在判断物源沉积时代和分析周缘大地构造演化有着重要的作用,已成为国际上研究热点之一^[2]。越来越广泛地应用于沉积物源的年代学研究,为沉积地层时代限定、大地构造背景分析、沉积物源区示踪^[3-7],沉积盆地基底性质确定及其演化等^[8-9]提供了强有力的工具。

本文对出露于柴达木盆地北缘乌兰县牦牛山地区的具代表性的晚泥盆世牦牛山组砂岩样品开展了碎屑锆石 U-Pb (LA-ICP-MS) 定年研究,确定了其年龄谱特征。所采两组样品年龄峰值基本重合,对该区

沉积时代进行了较准确的约束。在此基础上探讨了泥盆系物源特征及其对前寒武纪基底的指示作用,以及其沉积源区的地质意义。

1 地质背景

研究区位于柴达木盆地北缘东部乌兰县境内,处于欧龙布鲁克陆块与柴达木陆块之间的柴北缘超高压构造带,其由靠近北部的滩间山蛇绿杂岩—陆缘岛弧带和靠近南部的鱼卡—沙柳河超高压变质带组成;研究区相对更接近滩间山岛弧构造带,其主要分布在鱼卡、赛什腾山、滩间山、达肯达坂山、绿梁山东部、乌兰柯柯盐湖西及乌兰南部托莫尔日特和灰狼沟一带^②。由于其特殊的构造位置,陆—陆碰撞剧烈加之频繁的岩浆活动造就了柴北缘现今复杂的地质构造面貌。

柴达木北缘地区前寒武系为一套中—深变质岩系,主要由片麻岩、云母片岩及斜长角闪岩等组成;乌

^① 国家科技重大专项课题(编号:2011ZX05003-006)资助

^② 天津地质矿产研究所. 中华人民共和国区域地质调查报告. 鱼卡沟幅、西泉幅(1:50000), 2003.

收稿日期:2014-05-20; 收修改稿日期:2014-06-12

兰地区内出露地层主要包括:古元古代达肯达坂群,分布在阿姆内格山北部、纳仁沟、呼德生沟东部及牦牛山东部托莫尔日特一带,主要由混合岩、片麻岩,片岩及大理岩等深变质岩组成;中元古代万洞沟群分布在乌兰县西北部哇洪山附近,为中深变质岩系^[10]。早古生代发育两套沉积组合,一套为主要由薄层灰岩、砂质页岩及火山岩等组成大陆边缘海相活动型沉积,包括滩间山群、赛什腾组等;主要分布在乌兰县托莫尔日特、同普乡呼拉达沃及希里沟镇布拉格斯塔,主要由变火山岩和变碎屑岩组成,出露岩体普遍遭受剥蚀和低绿片岩相变质作用改造^[10-11]。另一套为主要由生物碎屑灰岩、白云岩、笔石页岩等大陆台地相稳定型沉积,包括欧龙布鲁克群、多泉山组等;上泥盆统牦牛山组为一套未变质弱变形的陆相碎屑岩—火山岩组合,它与下伏滩间山群和上覆的下石炭统城墙沟组均呈角度不整合接触关系^[10]。牦牛山组主要分布在西南牦牛山一带(为建组剖面),其次分布于西北部布赫特山北侧,现有资料表明区内泥盆纪地层普遍缺失中、下泥盆统。石炭系仅在牦牛山南坡附近有出露,由灰岩、砾岩等组成,角度不整合于泥盆系之上^①。下一中侏罗统在区内零星分布,新近系及第四系广泛分布在山间盆地及河谷沿岸^[10,12]。

本区具长期复杂地质演化历史,主要经历前寒武

纪、早古生代、晚古生代、中生代不同时期、不同体制构造动力作用,构造变形复杂,岩浆活动强烈。

2 样品采集处理与结果分析

2.1 样品采集

牦牛山泥盆系由下、上两段组成(图1)。下段(D_3m^a)下部为紫灰色厚层块状钙质石英砂岩、含砾粗砂岩,及紫红色中厚层块状中粗粒砂岩夹砾岩透镜,砾石多为棱角状和次棱角状,分选性差,自下而上粒度变粗(图3);中部为灰紫色巨厚层块状中粗粒砾岩;上部为灰紫色厚层块状中粗粒砂岩、含砾砂岩,并夹有少量灰绿色厚层块状含砾粗砂岩。砾石成分复杂,磨圆度、分选性好,砂岩局部可见交错层理。

上段(D_3m^b)下部以碎屑岩为主夹火山岩,有灰绿色、紫灰色厚层块状砾岩、含砾砂岩,粗砂岩夹灰紫色杏仁状安山岩;上部以火山岩为主夹碎屑岩,有灰紫色、灰绿色、紫红色辉石安山岩、杏仁状辉石安山岩、安山岩、安山集块岩,安山角砾岩,含砾安山熔岩凝灰岩。

用于定年研究的两件砂岩样品均采自牦牛山组下段,分别为浅紫色粗砂岩 08WL-04 和浅紫色含细粉砂岩 08WL-05。采样地点位于乌兰县西南牦牛山。样品 08-WL04 地理坐标为 $98^{\circ}14'16.7''$ N、 $36^{\circ}49'9.9''$ E,

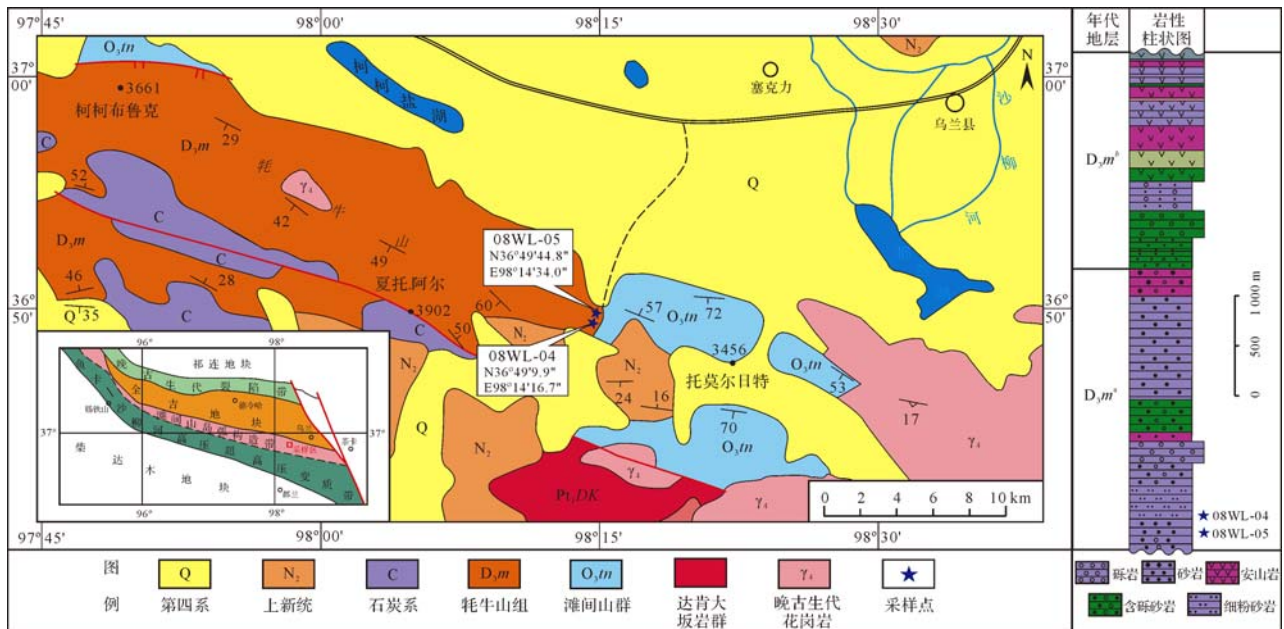


图1 乌兰地区地质简图及采样位置(据乌兰幅1/20万地质图修编;★为采样位置)

Fig.1 Geological sketch map of Wulan area and the sampling locations

① 青海省地质局.乌兰幅1/20万区域地质调查说明书[R].1966

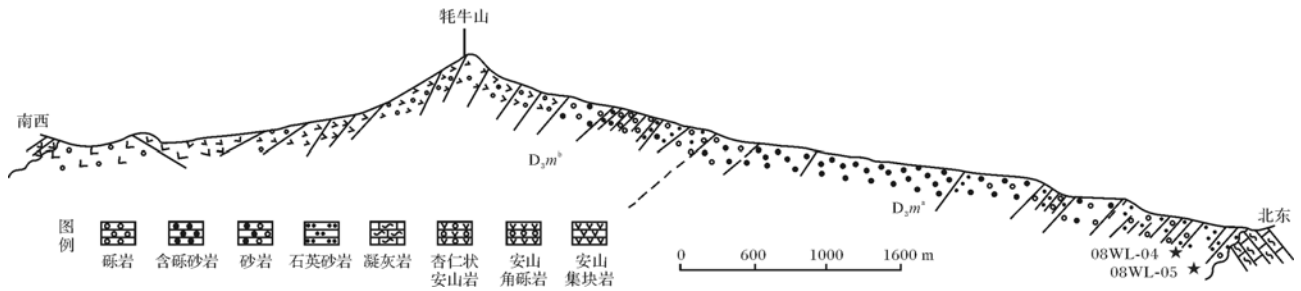


图2 牦牛山上泥盆统标准剖面图(据乌兰幅1/20万地质图修编;★为采样位置)

Fig.2 Standard profile from Upper Devonian in Maoniushan Mountain

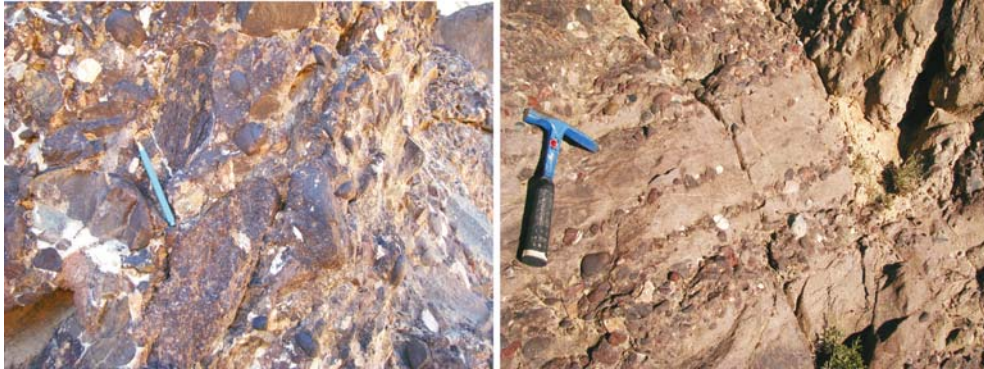


图3 牦牛山晚泥盆世牦牛组砂砾岩野外照片

Fig.3 Field photograph of gravelstone from Late Devonian Maoniushan Formation in Maoniushan Mountain

高程约为 3 118 m;样品 08-WL05 为 $36^{\circ}49'44.8''$ N, $98^{\circ}14'34''$ E, 高程约为 3 096 m。它们均位于同一剖面的下部(图 1, 2)。浅紫色粗砂岩(08WL-04)和浅紫色含细粉砂岩(08WL-05)主要由杂砂岩、长石石英砂岩岩屑石英砂岩等组成,以中—细粒为主,填隙物成分一般为黏土矿物和方解石杂基,多为颗粒支撑结构和接触式胶结类型(图 3)。磨圆度主要为次棱角状,次圆状,少数混圆状,分选较差,表明以上砂岩经历了较短距离搬运,属于近—中源快速沉积,可能反映出近物源与远物源混合沉积特征。

2.2 样品处理与结果分析

2.2.1 分析与处理

锆石的 U-Pb 定年工作在北京大学大陆动力学国家重点实验室完成。按照重力和磁法分选锆石,在双目镜下挑出测年样品,将锆石样品制靶打磨抛光,用阴极发光(CL)研究锆石形态(图 4),在激光等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪上分析 U-Pb 同位素。激光剥蚀系统为德国公司生产的 GeoLas200M,激光器由德国 Lambda Physik 生产(波长 193 nm 工作物质 ArF-excimer)。激光剥蚀利用氦气为载气,斑束孔径 30 μm ,剥蚀深度 20~40 μm ,激光频率为 10 Hz,能量为 0.032~0.036 J,利用锆石 91500 对同位素组成进

行外标校正。LA-ICP-MS 详细分析及数据处理参见^[13-14]。

样品 08WL-04 与 08WL-05 中分别各选取 36 粒锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析,分别获得了 45 与 46 个测点的分析数据(表 1, 2)。08WL-04 中锆石的 U、Th 含量分别为 $71.85 \times 10^{-6} \sim 1\ 008.63 \times 10^{-6}$ 和 $23.14 \times 10^{-6} \sim 484.73 \times 10^{-6}$, Th/U 介于 0.14~1.56(表 1);08WL-05 中锆石的 U、Th 含量分别为 $28.41 \times 10^{-6} \sim 935.77 \times 10^{-6}$ 和 $12.11 \times 10^{-6} \sim 645.01 \times 10^{-6}$, Th/U 介于 0.1~2.57(表 2)。

根据碎屑锆石的年龄分布,考虑到 <1 000 Ma 的锆石颗粒中一般无 Pb 损失,放射性成因²⁰⁷Pb 的积累也较少,以及普通 Pb 校正的不确定性,容易产生较大误差,因而采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄为测点的锆石年龄;对于年龄 <1 000 Ma 的锆石颗粒,因一般无 Pb 损失而采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄;对于年龄 >1 000 Ma 的锆石颗粒,因含较多放射性成因 Pb 而采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表面年龄^[9, 15-16]。样品数据利用 IsoPlot3.0^[17]进行谐和曲线分析。结果表明,在 LA-ICP-MS 锆石²⁰⁷Pb/²³⁵U 与²⁰⁶Pb/²³⁸U 谐和图上,除个别点稍偏离谐和线外,其他点均位于谐和曲线附近或其右下侧,体现出较好的谐和性,无明显 Pb 损失(图 5, 6)。

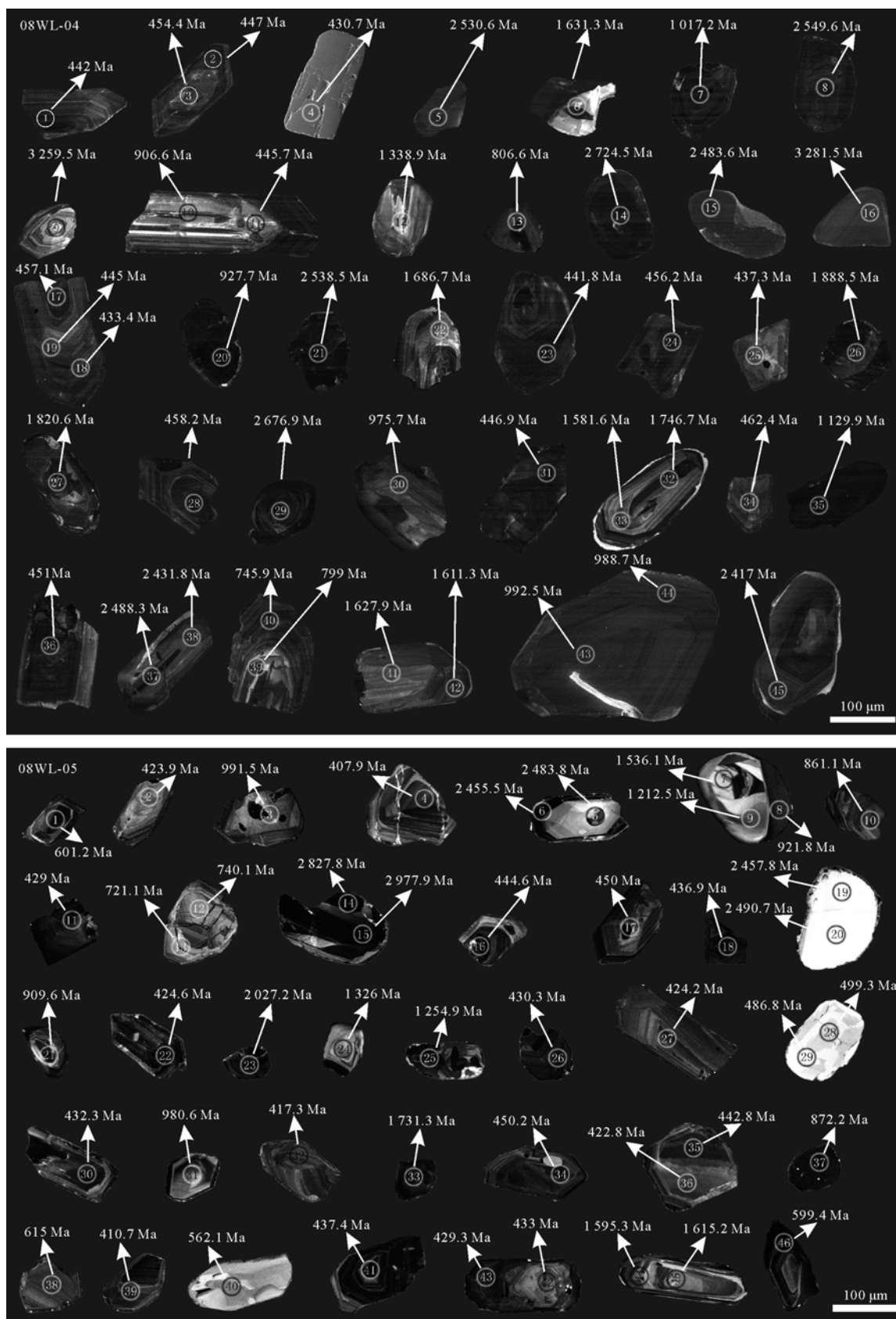


图 4 08WL-04 和 08WL-05 砂岩样品中的碎屑锆石阴极发光图

Fig.4 The CL images of detrital zircons from sandstone samples of 08WL-04 and 08WL-05

2.2.2 锆石成因与年龄分布

两组样品中大多数锆石不同程度保留了岩浆锆石原有的晶形,韵律振荡环带清晰规则,自形到半自形,少数锆石边部具有一定磨圆,晶体完整,两组样品锆石 Th/U 分别介于 0.14~1.56 和 0.1~2.57,表明样品中的碎屑锆石多数为岩浆成因,同时也反映了研究区沉积速度快,距离物源区近等特点。其中少量锆石结构复杂,具有残留晶核,边部可见亮白色增生边,具有变质锆石或岩浆捕获锆石再沉积的特征。

从碎屑锆石 U-Pb 年龄分布图中可以看出(图 7, 8);08WL-04 碎屑锆石表面年龄值分布很宽,在 430.7 ±7 Ma~3 281.5±46 Ma 之间(图 7),主要集中在 430~460 Ma,主峰值为 442 Ma,以早志留—早奥陶世居多,占 33.3%,其他依次为中元古代约 20%;新元古代约 17.8%;古元古代约 13.3%;太古代约占 15.6%。

08WL-05 碎屑锆石表面年龄值分布范围也很宽(图 8),在 407.9±7 Ma~2977.9±47 Ma 之间,主要集中在 407.9~499.3 Ma,占 43.5%,主峰值为 429 Ma,属于早奥陶世至早泥盆世;其他次要峰值为新元古代约占 26.1%,中元古代约占 15.2%,太古代约占4.3%。

根据碎屑锆石 U、Th 元素含量及其比值、年龄分布、CL 组构,将碎屑锆石年龄综合划分为 5 个年龄区间(图 4、表 1,2):

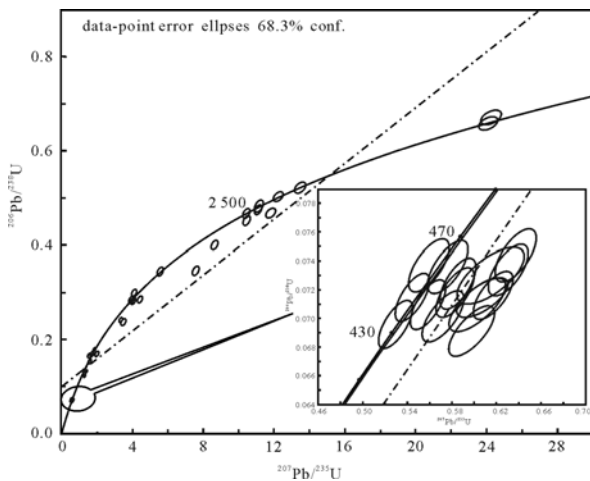


图 5 样品 08WL-04 砂岩碎屑锆石 ²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U 谐和图

Fig.5 U-Pb concordia diagram of detrital zircons from sample 08WL-04

(1) 400~500 Ma 段共 29 粒锆石,获测点 35 个, Th/U 介于 0.28~0.56。其中,08WL-04 中 12 粒,测点 15 个(包括点 1、2、3、4、10、17、18、19、23、24、25、28、

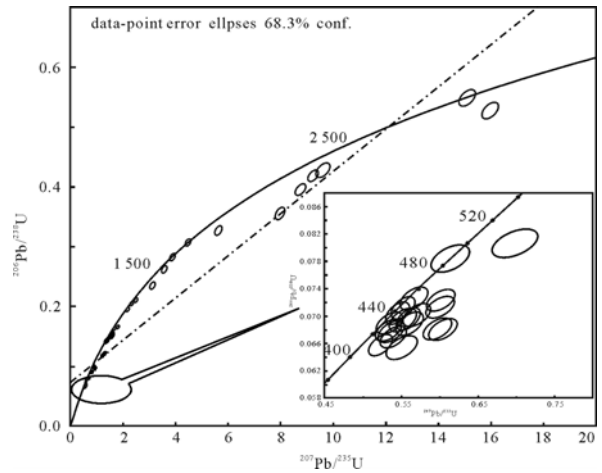


图 6 样品 08WL-05 砂岩碎屑锆石 ²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U 谐和图

Fig.6 U-Pb concordia diagram of detrital zircons from sample 08WL-05

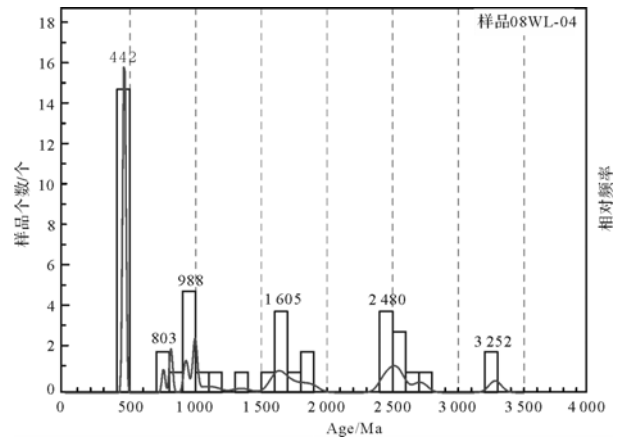


图 7 样品 08WL-04 碎屑锆石 U-Pb 年龄频谱 Fig.7 Detrital zircon age frequency and probability plots for sample 08WL-04

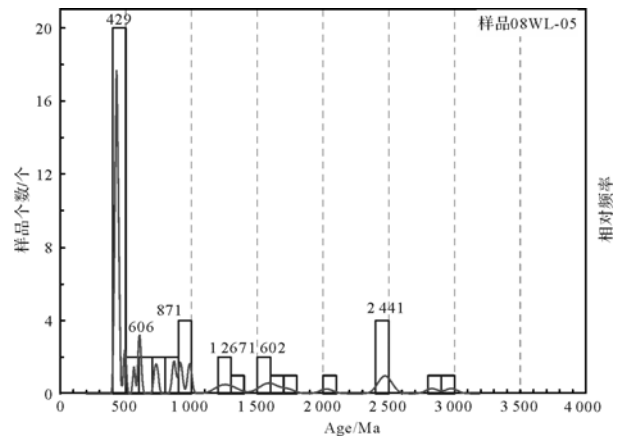


图 8 样品 08WL-05 碎屑锆石 U-Pb 年龄频谱 Fig.8 Detrital zircon age frequency and probability plots for sample 08WL-05

31、34、36),其峰值年龄为 442 Ma, Th/U 比值 0.35~0.5(表 1)。测点 24、25 的环带模糊, Th/U 比为 0.5、0.4,可见继承性锆石核,为变质锆石,其余均为岩浆锆石。点 2、3 为同一锆石晶体的边部与核部,可见增生边, Th/U 比分别为 0.41、0.43,其测点年龄一致;点 4 呈柱状亮色无规则环带, Th/U 为 0.37;点 23 具有继承性锆石核;点 36 核部环带清晰,增生边发亮较宽, Th/U 为 0.42,其余均环带清晰。

08WL-05 中 17 粒,获测点 20 个(包括点 2、4、11、16、17、18、22、26、27、28、29、30、32、34、35、36、39、41、42、43),年龄在 429 Ma 出现峰值, Th/U 介于 0.28~0.56(表 2),点 16、18、28、29、39 为变质锆石,其余均为岩浆锆石。点 16、39 锆石均呈圆卵形,晶棱圆滑,具有继承性锆石核,可见较宽的亮色增生边, Th/U 分别为 0.4、0.37;点 2、34 环带清晰,晶形规则, Th/U 为 0.56、0.43;点 4、26、27、32 环带清晰, Th/U 分别为 0.37、0.35、0.37、0.37;点 11 环带较清晰,可见暗色增生边, Th/U 为 0.45;点 17 环带清晰,具有继承性晶核, Th/U 为 0.5;点 22、41 环带清晰,晶形规则,可见亮色增生边, Th/U 分别为 0.34、0.44;点 30 核部发光不一,环带清晰,晶形规则, Th/U 为 0.49;点 28、29 为同一锆石,亮色,无环带, Th/U 为 0.52、0.28, Nb 值为 0.31×10^{-6} 、 0.27×10^{-6} , Ta 值为 0.13;点 35、36 亦为同一锆石,两点年龄相近,环带清晰, Th/U 为 0.47、0.43;点 42 及 43 处于同一锆石的核部与边部,年龄相近,环带清晰,晶形规则, Th/U 分别为 0.54 及 0.37,它们均为岩浆锆石。

(2) 560~1 100 Ma 段共 18 粒锆石,获测点 21 个, Th/U 介于 0.13~2.57。

08WL-04 中 7 粒,获测点 9 个(包括点 7、11、13、20、30、39、43、40、44),主峰为 988 Ma,次峰为 803 Ma, Th/U 介于 0.14~1.44(表 1),除点 20 外,其余均为岩浆锆石。其中 13 号点 CL 图像呈现出边部与核部有明显差异不一致,表明有继承性锆石核, Th/U 为 0.58;点 20 无环带,核部不发光, Th/U 较低为 0.14,最外层可见较窄的亮白色增生边,为变质锆石;点 30 的 Th/U 为 0.4;其余点锆石环带均清晰。

08WL-05 中 12 粒,获测点 13 个:点 1、3、8、10、12、13、21、31、37、38、40、46,主峰值为 606 Ma,次峰值为 871 Ma, Th/U 介于 0.13~2.57(表 2)。其中点 1、12、13、38、40、46 均为岩浆锆石,点 1、46 环带清晰,晶形规则, Th/U 分别为 0.39、0.53;点 12、13 为同一锆石的核部及边部,具有继承性锆石核,环带较清

晰,两点年龄相近, Th/U 分别为 0.66 及 1.22;点 38 环带较清晰, Th/U 为 0.59;点 40 无环带,整体呈亮白色, Th/U 为 2.57;点 3、10、31 环带清晰,可能为岩浆锆石。其中 3 号点有继承性锆石核。点 8、21、37 均为变质锆石。8 号点锆石 Th/U 为 0.11;点 21 有继承性核,磨圆好,晶棱圆滑;点 37 无环带, Th/U 为 0.13,可见薄亮色增生边。

(3) 1 100~1 900 Ma 段共 13 粒锆石,获测点 17 个。 Th/U 介于 0.17~1.56。

08WL-04 中 8 粒,获测点 10 个(包括点 6、12、22、26、27、32、33、35、41、42),峰值 1 605 Ma, Th/U 为 0.17~1.56(表 1)。点 6、22、26、35 为变质锆石,其余均为岩浆锆石。点 6 晶棱圆滑, Th/U 为 0.41;点 22、35 均呈圆卵形,晶棱圆滑, Th/U 为 0.58、0.21,其中点 35 可见薄亮色增生边;点 26 无环带,暗色, Th/U 为 0.17;点 12 锆石呈亮色, Th/U 为 0.22;点 27 环带较清晰, Th/U 为 1.56;点 32、33 分别为同一锆石的核部与边部,环带清晰,外形较规则, Th/U 为 0.38、0.47,其年龄相差 165.1 Ma,暗示至少经历了两期热事件;点 41、42 位于同一锆石的核部及边部,环带清晰,形状规则,年龄一致。

08WL-05 中 5 粒,获测点 7 个(包括点 7、9、24、25、33、44、45),出现双峰值,分别为 1 267 Ma 及 1 602 Ma, Th/U 介于 0.31~0.91(表 2)。点 7、9、33 为变质锆石。点 8、9、7 分别对应同一锆石的边部、中部、核部,年龄为 921.8 Ma、1 212.5 Ma、1 536.1 Ma,相差 290.7 Ma 和 323.6 Ma,暗示可能遭受了三期变质改造;点 33 无环带,边部可见很薄的亮色增生边;点 24、25、44、45 均为岩浆锆石,环带清晰,25 号点 Th/U 为 0.31。

(4) 2 000~2 800 Ma 段共 11 粒锆石,获测点 14 个, Th/U 介于 0.10~1.27。

08WL-04 中 8 粒,获测点 9 个(包括点 5、8、14、15、21、29、37、38、45),峰值为 2 480 Ma, Th/U 介于 0.15~0.95(表 1)。点 5、15、29 为变质锆石,其余为岩浆锆石。点 5 呈暗色,无环带, Th/U 为 0.83;点 15 无环带,呈圆卵形, Th/U 为 0.15;点 29 呈圆卵形,晶棱圆滑, Th/U 为 0.63;点 8 环带较清晰, Th/U 为 0.2;点 14 无环带,增生边较宽, Th/U 为 0.57;点 21 呈暗色,无环带, Th/U 为 0.28;点 37、38 位于同一锆石的核部,环带清晰,形状规则,年龄基本一致。

08WL-05 中 3 粒,获测点 5 个(包括点 5、6、19、20、23),峰值年龄 2441 Ma, Th/U 介于 0.10~1.27

表1 样品08WL-04碎屑锆石LA-ICP-MS U-Pb测年分析结果
Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of sample 08WL-04

锆石编号	元素比值			同位素比值				表面年龄(Ma)							
	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	年龄	1 σ
08wl-04-1	0.48	0.061 74	0.002 37	0.604 39	0.017 18	0.070 97	0.001 22	665.1	80	480	11	442	7	442	7
08wl-04-2	0.41	0.061 62	0.002 34	0.610 31	0.017 21	0.071 79	0.001 24	661.1	79	483.8	11	447	7	447	7
08wl-04-3	0.43	0.060 94	0.002 51	0.613 9	0.019 9	0.073 03	0.001 3	637	86	486	13	454.4	8	454.4	8
08wl-04-4	0.37	0.062 83	0.002 19	0.598 16	0.013 74	0.069 1	0.001 13	702.4	73	476.1	9	430.7	7	430.7	7
08wl-04-5	0.83	0.167 28	0.005 32	10.441 35	0.190 71	0.453 01	0.007 42	2 530.6	52	2 474.7	17	2 408.6	33	2 530.6	52
08wl-04-6	0.41	0.100 39	0.003 22	3.334 99	0.062 54	0.241 09	0.003 89	1 631.3	58	1 489.3	15	1 392.4	20	1 631.3	58
08wl-04-7	0.35	0.073 12	0.002 34	1.704 24	0.031 59	0.169 15	0.002 71	1 017.2	63	1 010.1	12	1 007.4	15	1 017.2	63
08wl-04-8	0.20	0.169 19	0.005 16	11.077 37	0.178	0.475 11	0.007 49	2 549.6	50	2 529.7	15	2 505.9	33	2 549.6	50
08wl-04-9	0.32	0.262 12	0.008 12	24.220 08	0.418 62	0.670 38	0.011	3 259.5	48	3 277.3	17	3 307.3	42	3 259.5	48
08wl-04-10	0.35	0.062 53	0.002 02	0.616 95	0.012	0.071 58	0.001 15	692.2	67	487.9	8	445.7	7	445.7	7
08wl-04-11	0.50	0.076 06	0.002 39	1.583 32	0.028 35	0.151 01	0.002 42	1 096.7	62	963.7	11	906.6	14	906.6	14
08wl-04-12	0.22	0.086 04	0.003 03	2.006 07	0.047 67	0.169 14	0.002 85	1 338.9	67	1 117.6	16	1 007.4	16	1 338.9	67
08wl-04-13	0.58	0.070 58	0.002 32	1.297 05	0.026 53	0.133 3	0.002 17	945.3	66	844.4	12	806.6	12	806.6	12
08wl-04-14	0.57	0.187 97	0.005 67	13.519 16	0.216 34	0.521 66	0.008 28	2 724.5	49	2 716.6	15	2 706.2	35	2 724.5	49
08wl-04-15	0.15	0.162 67	0.004 9	11.555 6	0.185 99	0.515 2	0.008 21	2 483.6	50	2 569.1	15	2 678.8	35	2 483.6	50
08wl-04-16	0.36	0.265 82	0.007 97	24.143 05	0.386 83	0.658 62	0.010 53	3 281.5	46	3 274.2	16	3 261.8	41	3 281.5	46
08wl-04-17	0.41	0.056 84	0.001 84	0.575 95	0.011 46	0.073 48	0.001 19	484.5	70	461.9	7	457.1	7	457.1	7
08wl-04-18	0.38	0.055 33	0.001 74	0.545 39	0.010 14	0.071 47	0.001 15	425.4	68	442	7	445	7	445	7
08wl-04-19	0.38	0.055 24	0.001 75	0.5298	0.010 12	0.069 54	0.001 12	421.8	69	431.7	7	433.4	7	433.4	7
08wl-04-20	0.14	0.074 04	0.002 22	1.580 53	0.025 84	0.154 78	0.002 48	1 042.5	59	962.6	10	927.7	14	927.7	14
08wl-04-21	0.28	0.168 07	0.005 01	11.151 13	0.178 13	0.481 05	0.007 7	2 538.5	49	2 535.8	15	2 531.8	34	2 538.5	49
08wl-04-22	0.58	0.103 44	0.003 13	4.032 43	0.067 8	0.282 64	0.004 56	1 686.7	55	1 640.8	14	1 604.7	23	1 686.7	55
08wl-04-23	0.36	0.057 1	0.001 82	0.558 68	0.010 94	0.070 93	0.001 15	494.9	69	450.7	7	441.8	7	441.8	7
08wl-04-24	0.50	0.062 34	0.001 92	0.630 63	0.011 38	0.073 33	0.001 19	686	65	496.5	7	456.2	7	456.2	7
08wl-04-25	0.40	0.059 15	0.001 99	0.572 59	0.012 73	0.070 18	0.001 16	572.5	71	459.7	8	437.3	7	437.3	7
08wl-04-26	0.17	0.115 55	0.003 52	5.504 86	0.096 89	0.345 35	0.005 68	1 888.5	54	1 901.4	15	1 912.4	27	1 888.5	54
08wl-04-27	1.56	0.111 29	0.003 33	4.379 35	0.073 67	0.285 25	0.004 65	1 820.6	53	1 708.5	14	1 617.7	23	1 820.6	53
08wl-04-28	0.49	0.055 09	0.001 75	0.559 8	0.011 12	0.073 67	0.001 21	415.6	69	451.4	7	458.2	7	458.2	7
08wl-04-29	0.63	0.182 63	0.005 43	11.773 95	0.195 13	0.467 34	0.007 66	2 676.9	48	2 586.6	16	2 471.9	34	2 676.9	48
08wl-04-30	0.40	0.069 99	0.002 12	1.577 83	0.027 61	0.163 41	0.002 67	928.2	61	961.5	11	975.7	15	975.7	15
08wl-04-31	0.36	0.058 91	0.001 82	0.583 39	0.010 88	0.071 79	0.001 18	563.7	66	466.6	7	446.9	7	446.9	7
08wl-04-32	0.38	0.106 87	0.003 13	3.488 22	0.055 88	0.236 62	0.003 85	1 746.7	53	1 524.6	13	1 369.1	20	1 746.7	53
08wl-04-33	0.47	0.097 75	0.002 89	3.841 95	0.063 6	0.284 93	0.004 66	1 581.6	54	1 601.6	13	1 616.1	23	1 581.6	54
08wl-04-34	0.38	0.062 1	0.001 95	0.637 07	0.012 45	0.074 37	0.001 23	677.4	66	500.5	8	462.4	7	462.4	7
08wl-04-35	0.21	0.077 34	0.002 34	1.900 68	0.033 92	0.178 17	0.002 94	1 129.9	59	1 081.3	12	1 057	16	1 129.9	59
08wl-04-36	0.42	0.058 5	0.001 76	0.584 77	0.010 35	0.072 46	0.001 19	548.7	64	467.5	7	451	7	451	7
08wl-04-37	0.95	0.157 76	0.004 63	7.554 02	0.124 12	0.347 14	0.005 72	2 431.8	49	2 179.4	15	1 920.9	27	2 431.8	49
08wl-04-38	0.91	0.163 12	0.004 76	10.440 81	0.169 62	0.464 03	0.007 63	2 488.3	48	2 474.7	15	2 457.3	34	2 488.3	48
08wl-04-39	1.44	0.075 59	0.002 27	1.279 06	0.022 59	0.122 68	0.002 02	1 084.2	59	836.4	10	745.9	12	745.9	12
08wl-04-40	1.05	0.074 52	0.002 2	1.356 21	0.022 89	0.131 95	0.002 17	1 055.4	59	870.2	10	799	12	799	12
08wl-04-41	0.42	0.099 32	0.003 04	3.889 21	0.072 81	0.283 93	0.004 78	1 611.3	56	1 611.4	15	1 611.1	24	1 611.3	56
08wl-04-42	0.40	0.100 21	0.002 92	4.132 18	0.067 87	0.298 99	0.004 93	1 627.9	53	1 660.7	13	1 686.3	24	1 627.9	53
08wl-04-43	0.67	0.068 54	0.002 03	1.566 75	0.027 15	0.165 75	0.002 74	884.9	60	957.1	11	988.7	15	988.7	15
08wl-04-44	0.54	0.067 05	0.002	1.539 07	0.027 06	0.166 45	0.002 76	839.2	61	946.1	11	992.5	15	992.5	15
08wl-04-45	0.48	0.156 39	0.004 5	8.614 5	0.137 4	0.399 46	0.006 59	2 417	48	2 298.1	15	2 166.5	30	2 417	48

表2 样品 08WL-05 的碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年分析结果
Table 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of sample 08WL-05

锆石编号	元素比值			同位素比值				表面年龄(Ma)							
	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	年龄	1 σ
08WL-05-1	0.39	0.06 99	0.002 22	0.942 52	0.018 24	0.097 75	0.001 6	925.5	64	674.2	10	601.2	9	601.2	9
08WL-05-2	0.56	0.064 49	0.002 11	0.604 64	0.012 47	0.067 97	0.001 11	757.9	68	480.2	8	423.9	7	423.9	7
08WL-05-3	0.57	0.078 17	0.002 59	1.792 8	0.037 15	0.166 27	0.002 74	1 151.3	64	1 042.8	14	991.5	15	991.5	15
08WL-05-4	0.37	0.061 4	0.002 27	0.553 18	0.014 37	0.065 32	0.001 1	653.4	77	447.1	9	407.9	7	407.9	7
08WL-05-5	0.98	0.159 99	0.004 66	9.243 12	0.147 13	0.418 9	0.006 79	2 455.5	48	2 362.4	15	2 255.5	31	2 455.5	48
08WL-05-6	0.32	0.162 69	0.004 74	7.977 9	0.126 79	0.355 55	0.005 75	2 483.8	48	2 228.5	14	1 961.1	27	2 483.8	48
08WL-05-7	1.43	0.095 4	0.002 96	3.103 7	0.059 02	0.235 88	0.003 91	1 536.1	57	1 433.6	15	1 365.2	20	1 536.1	57
08WL-05-8	0.11	0.076 06	0.002 27	1.612 63	0.027 42	0.153 73	0.002 49	1 096.6	59	975.1	11	921.8	14	921.8	14
08WL-05-9	0.77	0.080 63	0.002 48	2.170 64	0.039 85	0.195 18	0.003 2	1 212.5	59	1 171.7	13	1 149.4	17	1 212.5	59
08WL-05-10	0.68	0.069 15	0.002 11	1.362 95	0.024 38	0.142 91	0.002 33	903.1	62	873.1	10	861.1	13	861.1	13
08WL-05-11	0.45	0.059 16	0.001 83	0.561 44	0.010 51	0.068 81	0.001 12	573	66	452.5	7	429	7	429	7
08WL-05-12	0.66	0.074 85	0.002 35	1.221 77	0.023 55	0.118 35	0.001 94	1 064.4	62	810.6	11	721.1	11	721.1	11
08WL-05-13	1.22	0.077 55	0.002 34	1.301 35	0.022 48	0.121 66	0.001 97	1 135.4	59	846.3	10	740.1	11	740.1	11
08WL-05-14	0.15	0.219 62	0.006 47	15.976 24	0.256 71	0.527 4	0.008 55	2 977.9	47	2 875.4	15	2 730.5	36	2 977.9	47
08WL-05-15	0.11	0.200 2	0.005 86	15.137 94	0.238 33	0.548 2	0.008 82	2 827.8	47	2824	15	2 817.7	37	2 827.8	47
08WL-05-16	0.40	0.060 99	0.001 93	0.600 74	0.011 6	0.071 41	0.001 16	638.8	67	477.7	7	444.6	7	444.6	7
08WL-05-17	0.50	0.060 3	0.001 97	0.601 34	0.012 51	0.072 3	0.001 19	614.3	69	478.1	8	450	7	450	7
08WL-05-18	0.32	0.056 33	0.001 75	0.544 86	0.010 01	0.070 12	0.001 14	464.6	68	441.6	7	436.9	7	436.9	7
08WL-05-19	1.27	0.160 21	0.005 12	8.749 48	0.172 67	0.395 93	0.006 76	2 457.8	53	2 312.2	18	2 150.3	31	2 457.8	53
08WL-05-20	1.14	0.163 35	0.005 3	9.630 25	0.197 01	0.427 39	0.007 4	2 490.7	54	2 400.1	19	2 293.9	33	2 490.7	54
08WL-05-21	0.76	0.075 25	0.002 33	1.572 88	0.028 19	0.151 54	0.002 46	1 075.1	61	959.6	11	909.6	14	909.6	14
08WL-05-22	0.34	0.063 88	0.002 01	0.6	0.011 2	0.068 09	0.001 1	737.7	65	477.2	7	424.6	7	424.6	7
08WL-05-23	0.10	0.124 89	0.003 74	5.639 79	0.091 49	0.327 39	0.005 26	2 027.2	52	1 922.2	14	1 825.7	26	2 027.2	52
08WL-05-24	0.74	0.085 46	0.002 76	2.489 59	0.049 85	0.211 19	0.003 49	1326	61	1269	15	1 235.1	19	1326	61
08WL-05-25	0.31	0.082 39	0.002 53	2.329 88	0.040 67	0.205	0.003 31	1 254.9	59	1 221.4	12	1 202.1	18	1 254.9	59
08WL-05-26	0.35	0.055 92	0.001 72	0.532 42	0.009 25	0.069 02	0.001 11	449	67	433.4	6	430.3	7	430.3	7
08WL-05-27	0.37	0.057 09	0.001 84	0.535 61	0.010 64	0.068 01	0.001 11	494.5	70	435.5	7	424.2	7	424.2	7
08WL-05-28	0.52	0.056 92	0.002 24	0.615 93	0.018 24	0.078 45	0.001 34	487.9	85	487.3	11	486.8	8	486.8	8
08WL-05-29	0.28	0.062 76	0.002 42	0.697 13	0.019 84	0.080 53	0.001 38	700.2	80	537.1	12	499.3	8	499.3	8
08WL-05-30	0.49	0.057 62	0.001 81	0.551 17	0.010 01	0.069 35	0.001 12	514.9	68	445.8	7	432.3	7	432.3	7
08WL-05-31	0.80	0.074 25	0.002 28	1.682 7	0.028 8	0.164 3	0.002 64	1 048.3	61	1002	11	980.6	15	980.6	15
08WL-05-32	0.37	0.058 55	0.001 93	0.540 04	0.011 07	0.066 87	0.001 09	550.5	70	438.5	7	417.3	7	417.3	7
08WL-05-33	0.68	0.105 97	0.003 24	4.498 03	0.075 05	0.307 73	0.004 94	1 731.3	55	1 730.6	14	1 729.5	24	1 731.3	55
08WL-05-34	0.43	0.056 81	0.001 84	0.566 82	0.011 19	0.072 34	0.001 17	483.4	71	456	7	450.2	7	450.2	7
08WL-05-35	0.47	0.056 48	0.001 77	0.553 91	0.009 93	0.071 11	0.001 14	470.5	68	447.6	6	442.8	7	442.8	7
08WL-05-36	0.43	0.057 36	0.001 81	0.536 22	0.009 74	0.067 78	0.001 09	504.9	68	435.9	6	422.8	7	422.8	7
08WL-05-37	0.13	0.070 94	0.002 19	1.417 61	0.024 06	0.144 88	0.002 32	955.8	62	896.4	10	872.2	13	872.2	13
08WL-05-38	0.59	0.064 57	0.002 09	0.891 55	0.017 22	0.100 11	0.001 62	760.5	67	647.2	9	615	9	615	9
08WL-05-39	0.37	0.057 64	0.001 86	0.522 95	0.009 93	0.065 79	0.001 06	515.8	69	427.1	7	410.7	6	410.7	6
08WL-05-40	2.57	0.065 7	0.002 31	0.825 52	0.019 3	0.091 11	0.001 51	796.8	72	611.1	11	562.1	9	562.1	9
08WL-05-41	0.44	0.058 84	0.001 93	0.569 69	0.011 36	0.070 2	0.001 14	561.2	70	457.8	7	437.4	7	437.4	7
08WL-05-42	0.54	0.058 12	0.001 96	0.556 94	0.011 8	0.069 48	0.001 13	534	73	449.5	8	433	7	433	7
08WL-05-43	0.37	0.056 84	0.001 84	0.539 75	0.010 25	0.068 86	0.001 11	484.6	70	438.3	7	429.3	7	429.3	7
08WL-05-44	0.76	0.099 52	0.003 17	3.872 57	0.070 07	0.282 17	0.004 56	1 615.2	58	1 608	15	1 602.3	23	1 615.2	58
08WL-05-45	0.91	0.098 47	0.003 18	3.564 16	0.067 43	0.262 48	0.004 27	1 595.3	59	1 541.6	15	1 502.5	22	1 595.3	59
08WL-05-46	0.53	0.070 49	0.002 25	0.947 1	0.017 04	0.097 44	0.001 56	942.7	64	676.6	9	599.4	9	599.4	9

(表2)。点5、6、23为变质锆石,点19、20为岩浆锆石。点5、6位于同一锆石中部和边部,磨圆较好,增生边较宽;点23磨圆较好,环带模糊无规则,Th/U为0.1;点19、20位于同一锆石,呈亮色,Th/U分别为1.27、1.14。该年龄段的5个点均偏离谐和线较远,可能反映有较多的Pb损失。

(5) 2 800~3 300 Ma段共3粒锆石,获测点4个,Th/U介于0.11~0.36。

08WL-04中2粒,获测点2个(包括点9、16),年龄分别为 $3\,259.5\pm 48$ Ma、 $3\,281.5\pm 46$ Ma, Th/U为0.32、0.36(表1)。锆石颗粒环带较清晰,为岩浆锆石。两个点均在谐和线上,谐和度较高。

08WL-05中1粒,获测点2个(包括点14、15),年龄分别为 $2\,977.9\pm 47$ Ma、 $2\,827.8\pm 27$ Ma, Th/U为0.11、0.15(表2)。点14接近谐和线,点15位于谐和线上,环带较清晰,为岩浆锆石。

3 碎屑锆石年龄的地质意义与讨论

3.1 地层时代约束

乌兰县牦牛山是柴达木盆地北缘上泥盆统牦牛山组建组剖面。该套地层为一套未变质的陆相碎屑岩、火山岩沉积组合。但本区无确定地层时代的可靠证据,只是据其角度不整合覆于滩间山群之上,又被下石炭统不整合覆盖,并可与祁连山地区已采到化石的上泥盆纪颇为相似,故将其划为上泥盆统^①。

牦牛山组下部磨拉石建造中的砂岩碎屑锆石定年谱系主要峰值分布在429~442 Ma,表明锆石主要来自晚奥陶—中志留世的物源,而且获得的最年轻锆石年龄为407.9 Ma(岩浆成因锆石),可限定牦牛山组下部磨拉石建造的沉积下限时代,应不早于早泥盆世末期,显然该套定年数据为牦牛山建组区的磨拉石建造形成时间提供了有效的约束。该信息与近年来东昆仑地区不同区段同称为牦牛山组中所获定年信息有所不同。

据陆露等^[18]对东昆仑格尔木南大干沟—水泥厂地区牦牛山组不同层位的流纹岩夹层进行的精确锆石U-Pb(LA-MC-ICPM)定年研究,在大干沟南牦牛山组底部砾岩之上的流纹岩中获得了 423.2 ± 1.8 Ma的定年数据,上部的流纹岩中获得了 399.6 ± 2.8 Ma的定年数据;水泥厂东的牦牛山组底部砾岩之上的流纹岩定年为 408.2 ± 2.4 Ma,水泥厂北中上部的流纹岩

定年为 404.9 ± 4.8 Ma,据此限定大干沟—水泥厂地区该套地层形成间为400~423 Ma(晚志留世—早泥盆世)。张耀玲等^[19]对格尔木南五十公里处牦牛山组上部火山岩中的英安岩进行了锆石U-Pb(SHRIMP)定年获得了 406.1 ± 2.9 Ma的定年数据,亦认为该区原划的牦牛山组形成时代为晚志留世—早泥盆世,而非传统认为的晚泥盆世,因此,柴达木盆地南缘的所谓牦牛山组与北缘在形成时代上是不一致的,建议盆地南缘不应使用牦牛山组这一地层单元,以免引起争议^[10]。

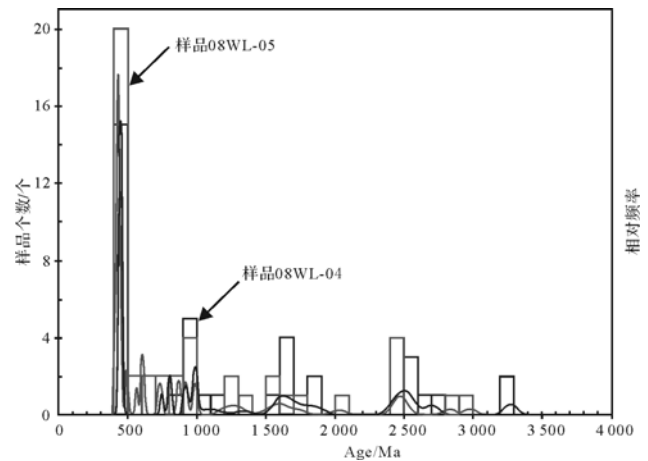


图9 样品08WL-04及08WL-05碎屑锆石U-Pb年龄频谱
Fig.9 Detrital zircon age frequency and probability plots for sample 08WL-04 and 08WL-05

牦牛山组是柴达木盆地周缘地区具代表性和区域可比性的地层系统。上述精确同位素定年资料将其形成时代限定为早泥盆世之后。结合区域已有的古生物资料,如在阿木尼克和牦牛山地区上部碎屑岩中采到植物化石*Leptophloeum rhombicum*,在祁漫塔格地区上部泥质碎屑岩夹层中采到植物化石*Lepidodendropsis* sp.,在肯得可克地区采得植物化石*Leptophloeum rhombicum*、*Sublepidodendron mirabile*等^[19]综合分析,笔者认为,牦牛山组代表了柴达木盆地北缘地区继早古生代海相地层系统之后,形成于晚泥盆世的一套重要陆相地层系统,代表了晚志留世—早泥盆世区域洋盆闭合之后,开始进入陆相盆地演化时期,为进一步深入认识区域构造演化提供了重要证据。

3.2 区域地质事件及沉积物源示踪

岩浆活动和变质作用是确定区域地质事件的两个重要方面。根据上述研究综合分析认为,本次所获

①青海省地质局. 乌兰幅1/20万区域地质调查说明书[R].1966.

得的91组定年数据中绝大多数(74%)为岩浆锆石,少量为变质锆石。所有岩浆、变质锆石定年数据所作的直方图共同显示,锆石定年数据形成五个峰值,且岩浆峰值和变质峰值基本重合(图9),它们分别为早古生代(400~500 Ma)、新元古代(560~1 100 Ma)、中—古元古代(1 100~1 900 Ma)、古元古代早期至新太古代(2 000~2 800 Ma)和中太古代(2 800~3 300 Ma),示踪区域可能存在五期区域性地质事件。其中,早古生代最为突出,其次为新元古代和古元古代早期—新太古代晚期。暗示这三期岩浆活动和变质作用较为活跃,为区内最重要的构造活动时期。

近年来,对柴达木盆地北缘地区的深入研究表明,柴达木盆地北缘地区虽经受古生代以来多期构造事件的叠加改造,但仍保存了前古生代诸多地质事件的地质记录,尤以新元古代和早古生代重大地质事件最为突出。本区以古元古界达肯达坂群和德令哈杂岩为代表的深变质基底杂岩之中,既发现了 $1\ 791\pm 37$ Ma的麻粒岩变质记录^[20],也发育大量 $1\ 020\pm 41\sim 803\pm 7$ Ma主要集中于950~850 Ma的花岗质片麻岩^[21-23]。

本次分析数据不仅记录了早元古代晚期基底形成的变质作用,而且也提供了新元古代早期基底经历重要造山作用而活化改造或再造,发育强烈岩浆活动的过程。

另外,本区南华纪至震旦纪的全吉群,是一套基本未变质弱变形,形成于大陆裂谷环境的滨海—浅海相碎屑岩、碳酸盐岩夹火山岩组合,其中玄武安山岩的锆石定年数据为 738 ± 28 Ma^[21-22,24-26]。该套地层以不整合关系覆于由古元古界达肯达坂群和德令哈杂岩组成的深变质基底杂岩之上,进一步证明新元古代早期基底活化的造山事件,同时还揭示区域新元古代晚期经历的伸展事件,并发育同时期的基性岩墙(733.6 ± 6.6 Ma)^[27]、钾长花岗岩(744 ± 28 Ma)^[21]等岩浆活动。新元古代晚期的伸展事件造成自南华纪开始柴达木盆地南、北缘古陆块裂解、离散、向洋发展,寒武纪—早奥陶世(蛇绿混杂岩 545.5 ± 6.0 Ma~ 466 ± 3.3 Ma)^[22,25,28-30],柴达木盆地南、北缘发展成为洋盆。奥陶纪柴北缘洋盆开始俯冲、消减,形成变质作用峰期在 496.4 ± 18 Ma~ 466.7 ± 1.2 Ma之间的超高压榴辉岩^[22,31-33,35]和俯冲、碰撞的岩浆杂岩(514.2 ± 8.5 Ma~ 426.2 ± 2.2 Ma)^[22,36-38]。

上述地质作用过程的岩浆建造和变质建造为牦牛山组砂岩及碎屑锆石沉积提供了丰富的物源。样

品中多数锆石年龄集中在早古生代,且绝大多数为岩浆锆石,这与柴北缘地区早古生代岩浆活动最为剧烈相一致。其中滩间山群在该区分布最为广泛,根据定年数据显示结合前人研究资料,元古代锆石应来自该区出露变质结晶基底,泥盆纪砂岩沉积物源应主要来自该区的滩间山群蛇绿混杂岩及晚志留岛弧岩浆活动形成的英云闪长岩及石英闪长岩等^[29-30]。前寒武纪地层出露齐全,岩浆活动频繁,构成了多个次要的锆石来源^[21,24,38-40]。

3.3 区域结晶基底示踪

本次测年资料显示两个定年样品中有20粒锆石来自于古元古代—古太古代,共25个点。其中14个点为岩浆锆石。08WL-04中古元古代8个点和太古代7个点(图4)。08WL-05中古元古代5个点,和太古代2个点(图4)。这些年龄数据与区内出露的达肯达坂岩群、德令哈杂岩(2366 ± 10 Ma及 2412 ± 14 Ma)^[21]、莫河片麻岩($2\ 348$ Ma)^[39-40]古元古代变质结晶基底杂岩系的发育相吻合。

值得注意的是,定年样品中还有9个点为太古代锆石,多数为岩浆锆石,其中两粒古太古代锆石年龄分别为 $3\ 259.5\pm 48$ Ma(点9)及 $3\ 281.5\pm 46$ Ma(点16),点9明显为岩浆锆石,具有清晰振荡环带(图4);点14、21为变质锆石,显然它们来自于太古代的变质地层和太古代的岩浆活动。但现有资料表明,区域内除在敦煌与阿尔金阿克塔什塔格一带发现有太古宙地层出露外^[41-42],柴北缘早古生代蛇绿岩、蛇绿混杂岩带和高压超高压变质岩带与北祁连早古生代蛇绿岩、蛇绿混杂岩带和高压变质岩带之间包括研究区在内均无太古代地层出露,那么如何理解牦牛山组存在太古代的变质地层和太古代的岩浆活动信息呢?我们已经注意到下述事实:据李怀坤等^[43]对北祁连山北大河岩群碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究表明,北大河岩群的蚀源区存在1 400~3 035 Ma的构造热事件,除约2 457 Ma的变质事件外,主要为岩浆事件,其中以1 800 Ma左右最为强烈,1 400~1 700 Ma次之,且显示其可能遭受过863 Ma变质作用影响。该信息与牦牛山组碎屑岩锆石年龄谱系非常相似,表明这些信息不是偶然的巧合,可能暗示区内应该发育太古代古老变质结晶基底,并经历相应地质事件,对此需进一步加强研究。

4 结论与认识

本文应用 LA-ICP-MS 法,对柴北缘乌兰县牦牛

山组2件砂岩样品中的71颗碎屑锆石进行了U-Pb年龄测定,获得了91点的年龄数据。碎屑锆石年龄主要分布在早古生代(400~500 Ma)、新元古代(560~1100 Ma)、中—古元古代(1100~1900 Ma)、古元古代早期至新太古代(2000~2800 Ma)和中太古代(2800~3300 Ma)五个峰值区间,且岩浆峰值和变质峰值基本重合。

牦牛山组下部磨拉石建造中的砂岩碎屑锆石定年谱系主要峰值在429~442 Ma之间,表明碎屑锆石主要来自晚奥陶—中志留世的物源,而且获得的最年轻锆石年龄为407.9 Ma(岩浆成因锆石),可限定牦牛山组下部磨拉石建造的沉积时代应不早于早泥盆世末期,这与区域上的古生物化石资料一致,而与柴达木盆地南缘原划分的上泥盆统契盖苏组不一致^[10]。

牦牛山组碎屑锆石的年龄分布表明本区可能存在五期区域性地质事件。其中,早古生代最为突出,其次为新元古代和古元古代早期—新太古代晚期,暗示这三期岩浆活动和变质作用较为活跃,为区内最重要的构造活动时期。

本次测年资料显示两个定年样品中有17粒锆石20个测点的年龄为古元古代—古太古代,其中14个测点为岩浆锆石,表明区内出露的达肯达坂岩群、德令哈杂岩、莫河片麻岩为重要的碎屑锆石来源。其中两粒锆石年龄为古太古代,暗示区内可能发育太古代古老变质结晶基底,并经历相应地质事件,对此需进一步加强研究。

致谢 感谢审稿专家的精心指导。在本项目研究过程中,赵吉林、陈峰、郑茜、徐明璞、高金栋等一起参加了野外地质考察研究,在此表示感谢。样品分选及分析测试是在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行的,对他们给予本项目的支持与辛勤工作,也表示感谢。

参考文献(References)

- 1 郑萍,李大鹏,陈岳龙,等. 黄河口河流沙碎屑沉积物锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 现代地质, 2013, 27(1): 79-90. [Zheng Ping, Li Dapeng, Chen Yuelong, et al. Zircon U-Pb Ages of clastic sediment from the outfall of the Yellow River and their geological significance [J]. Geoscience, 2012, 27(1): 79-90.]
- 2 郭光辉,张宝收,郭春利,等. 塔里木盆地北部志留系碎屑锆石测年及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(3): 418-426. [Wu Guanghui, Zhang Baoshou, Guo Chunli, et al. Detrital zircon U-Pb dating for the Silurian in northern Tarim Basin and its significance [J].

- Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(3): 418-426.]
- 3 Fedo C M, Eriksson K A. Stratigraphic framework of the ~3.0 Ga Buhwa Greenstone Belt: a unique stable-shelf succession in the Zimbabwe Archean Craton [J]. Precambrian Research, 1996, 77(3/4): 161-178.
- 4 Dhuime B, Bosch D, Bruguier O, et al. Age, provenance and post-deposition metamorphic overprint of detrital zircons from the Nathorst Land group (NE Greenland)-A LA-ICP-MS and SIMS study [J]. Precambrian Research, 2007, 155(1/2): 24-46.
- 5 Willner A P, Sindern S, Metzger R, et al. Typology and single grain U/Pb ages of detrital zircons from Proterozoic sandstones in the SW Urals (Russia): early time marks at the eastern margin of Baltica [J]. Precambrian Research, 2003, 124(1): 1-20.
- 6 Moecher D P, Samson S D. Differential zircon fertility of source terranes and natural bias in the detrital zircon record: Implications for sedimentary provenance analysis [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 247(3/4): 252-266.
- 7 陈登超,赵省民,邓坚,等. 新疆东部博格达山北侧石炭系碎屑锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质学报, 2010, 84(12): 1770-1780. [Chen Dengchao, Zhao Xingmin, Deng Jian, et al. U-Pb dating of Carboniferous sandstone detrital zircon from the north of the Bogda Mountains, eastern Xinjiang, and its geological significances [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(12): 1770-1780.]
- 8 Smithies R H, Nelson D R, Pike G. Development of the Archaean Mallina Basin, Pilbara Craton, northwestern Australia: a study of detrital and inherited zircon ages [J]. Sedimentary Geology, 2001, 141-142: 79-94.
- 9 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[J]. 岩石学报, 2007, 23(7): 1577-1590. [Li Yaping, Li Jinyi, Sun Guihua, et al. Basement of Junggar basin: Evidence from detrital zircons in sandstone of previous Devonian Kalamaili Formation [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(7): 1577-1590.]
- 10 吴向农,古风宝. 青海省区域地质志 [M]. 北京:地质出版社, 1991:1-662. [Wu Xiangong, Gu Fengbao. Regional Geology of Qinghai Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1-662.]
- 11 赵凤清,郭进京,李怀坤. 青海锡铁山地区滩间山群的地质特征及同位素年代学 [J]. 地质通报, 2003, 22(1): 28-31. [Zhao Fengqing, Guo Jinjing, Li Huaikun. Geological characteristics and isotopic age of Tanjianshan Group along northern margin of Qaidam Basin [J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22(1): 28-31.]
- 12 韩伟,石菲菲,邹林. 青海省沙柳泉地区遥感地质填图及蚀变信息提取研究 [J]. 矿产勘查, 2011, 2(4): 421-427. [Han Wei, Shi Feifei, Zou Lin. Study on remote sensing geological mapping and alteration information extraction in Shaliuquan area, Qinghai province [J]. Mineral Exploration, 2011, 2(4): 421-427.]
- 13 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 [J]. 科学通报, 2003, 48(14): 1511-1520. [Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, et al. Precise determinations of U-Pb age and trace and rare earth element con-

- centrations of zircons by excimer LA-ICPMS using a two-stage ablation strategy[J]. *Science Bulletin of China*, 2003, 48(14): 1511-1520.]
- 14 Gao Shan, Liu Xiaomin, Yuan Honglin, et al. Determination of forty two major and trace elements in usgs and nist srm glasses by laser ablation - inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Geostandards Newsletter*, 2002, 26(2): 181-196.
 - 15 张建光,姚光庆,陈亚兵,等. 南襄盆地泌阳凹陷深水湖底扇厘定及碎屑锆石 U-Pb 年代学物源追踪[J]. *地球科学*, 2011, 36(6): 1105-1118. [Zhang Jianguang, Yao Guangqing, Chen Yabing, et al. Sub-Lacustrine fan of Chengdian and Zircon U-Pb ages and constraint on its provenance in Biyang depression, Nanxiang Basin, China[J]. *Earth Science*, 2011, 36(6): 1105-1118.]
 - 16 任军虎. 柴达木盆地南、北缘南华—泥盆纪构造演化[D]. 西安: 西北大学, 2010. [Ren Junhu. A study on tectonic evolution during the period of Nanhua to Devonian at the north and south of Qaidam Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2010.]
 - 17 Ludwig K R. User's manual for isoplot/ex version 3.00 - a geochronology toolkit for microsoft excel, No.4[Z]. Berkeley Geochronological Center, Special Publication, 2003, 1-70.
 - 18 陆露,吴珍汉,胡道功,等. 东昆仑牦牛山组流纹岩锆石 U-Pb 年龄及构造意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(4): 1150-1158. [Lu Lu, Wu Zhenhan, Hu Daogong, et al. Zircon U-Pb age for rhyolite of the Maoniushan Formation and its tectonic significance in the East Kunlun Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(4): 1150-1158.]
 - 19 张耀玲,胡道功,石玉若,等. 东昆仑造山带牦牛山组火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *地质通报*, 2010, 29(11): 1614-1618. [Zhang Yaoling, Hu Daogong, Shi Yuruo, et al. SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic significance of Maoniushan Formation volcanic rocks in East Kunlun orogenic belt, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(11): 1614-1618.]
 - 20 张建新,万渝生,许志琴,等. 柴达木北缘德令哈地区基性麻粒岩的发现及其形成时代[J]. *岩石学报*, 2001, 17(3): 453-458. [Zhang Jianxin, Wan Yusheng, Xu Zhiqin, et al. Discovery of basic granulite and its formation age in Delingha area, North Qaidam Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 453-458.]
 - 21 陆松年,王惠初,李怀坤,等. 柴达木盆地北缘“达肯大坂群”的再厘定[J]. *地质通报*, 2002, 21(1): 19-23. [Lu Songnian, Wang Huichu, Li Huaikun, et al. Redefinition of the “Dakendaban Group” on the northern margin of the Qaidam Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(1): 19-23.]
 - 22 李怀坤,陆松年,赵风清,等. 柴达木盆地北缘鱼卡河含柯石英榴辉岩的确定及其意义[J]. *现代地质*, 1999, 13(1): 43-50. [Li Huaikun, Lu Songnian, Zhao Qingfeng, et al. Determination and significance of the coesite eclogite on the Yuqia River on the north margin of the Qaidam Basin[J]. *Geoscience*, 1999, 13(1): 43-50.]
 - 23 Lu Songnian, Zhao Fengqing, Yu Haifeng, et al. Discovery and significance of eclogite-granitoid belts in Northwest China[J]. *Gondwana Research*, 1999, 2(1): 137-138.
 - 24 李怀坤,陆松年,王惠初,等. 青海柴达木北缘新元古代超大陆裂解的地质记录——全吉群[J]. *地质调查与研究*, 2003, 26(1): 27-37. [Li Huaikun, Lu Songnian, Wang Huichu, et al. Qianji group - the geological record of the rodonia supercontinent break-up in the early neoproterozoic preserved in the northern Qaidam margin, Qinghai, Northwest China [J]. *Geological Survey and Research*, 2003, 26(1): 27-37.]
 - 25 陆松年,于海峰,金巍,等. 塔里木古大陆东缘的微小大陆块体群[J]. *岩石矿物学杂志*, 2002, 21(4): 317-326. [Lu Songnian, Yu Haifeng, Jin Wei, et al. Microcontinents on the eastern margin of Tarim paleocontinent [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2002, 21(4): 317-326.]
 - 26 陆松年,李怀坤,相振群. 中国中元古代同位素地质年代学研究进展述评[J]. *中国地质*, 2010, 37(4): 1002-1013. [Lu Songnian, Li Huaikun, Xiang Zhenqun. Advances in the study of Mesoproterozoic geochronology in China: a review[J]. *Geology in China*, 2010, 37(4): 1002-1013.]
 - 27 任军虎,柳益群,周鼎武,等. 东昆仑小庙基性岩脉地球化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2010, 40(4): 859-868. [Ren Junhu, Liu Yiqun, Zhou Dingwu, et al. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating of basic Dykes in the Xiaomiao area, eastern Kunlun[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2010, 40(4): 859-868.]
 - 28 王惠初,陆松年,袁桂邦,等. 柴达木盆地北缘滩间山群的构造属性及形成时代[J]. *地质通报*, 2003, 22(7): 487-493. [Wang Huichu, Lu Songnian, Yuan Guibang, et al. Tectonic setting and age of the “Tanjianshan Group” on the northern margin of the Qaidam Basin [J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(7): 487-493.]
 - 29 韩英善,彭琛. 托莫尔日特蛇绿混杂岩带地质特征及其构造意义[J]. *青海地质*, 2000, 9(1): 18-25. [Han Yingshan, Peng Chen. Geological characteristics of Tuomuerrite ophiolite mélange belt and its tectonic significance[J]. *Geology in China*, 2000, 9(1): 18-25.]
 - 30 孙延贵,郝维杰,韩英善,等. 柴达木盆地北缘东段托莫尔日特似蛇绿岩岩石组合特征[J]. *中国区域地质*, 2000, 19(3): 258-264. [Sun Yangui, Hao Weijie, Han Yingshan, et al. Characteristics of the Tomorit ophiolite-like assemblage in the eastern sector of the northern margin of the Qaidam Basin[J]. *Regional Geology of China*, 2000, 19(3): 258-264.]
 - 31 张建新,杨经绥,许志琴,等. 柴北缘榴辉岩的峰期和退变质年龄: 来自 U-Pb 及 Ar-Ar 同位素测定的证据[J]. *地球化学*, 2000, 29(3): 217-222. [Zhang Jianxin, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, et al. Peak and retrograde age of eclogites at the northern margin of Qaidam Basin, northwestern China: Evidence from U-Pb and Ar-Ar dates [J]. *Geochimica*, 2000, 29(3): 217-222.]
 - 32 杨经绥,许志琴,宋述光,等. 青海都兰榴辉岩的发现及对中国中央造山带内高压——超高压变质带研究的意义[J]. *地质学报*, 2000, 74(2): 156-168. [Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Song Shuguang, et al. Discovery of eclogite in Dulan, Qinghai province and its significance for studying the HP - UHP metamorphic belt along the central orogenic belt of China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 74(2): 156-168.]
 - 33 杨经绥,张建新,孟繁聪,等. 中国西部柴北缘—阿尔金的超高压变质榴辉岩及其原岩性质探讨[J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 291-314. [Yang Jingsui, Zang Jianxin, Meng Fancong, et al. Ultrahigh

- pressure eclogites of the north Qaidam and Altun mountains, NW China and their protoliths [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 291-314.]
- 34 杨经绥,刘福来,吴才来,等. 中央碰撞造山带中两期超高压变质作用来自含柯石英锆石的定年证据[J]. *地质学报*, 2004, 77(4): 463-477. [Yang Jingsui, Liu Fulai, Wu Cailai, et al. Two ultrahigh pressure metamorphic events recognized in the central orogenic belt of China: Evidence from the U-Pb dating of coesite-bearing zircons [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 77(4): 463-477.]
- 35 宋述光,杨经绥. 柴达木盆地北缘都兰地区榴辉岩中透长石+石英包裹体: 超高压变质作用的证据[J]. *地质学报*, 2001, 75(2): 180-185. [Song Shuguang, Yang Jingsui. Sanidine + quartz inclusions in Dulan eclogites: Evidence for UHP metamorphism on the north margin of the Qaidam Basin, NW China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(2): 180-185.]
- 36 吴才来, Ireland T, Wooden J, 等. 祁连南缘噶喇山花岗岩 SHRIMP 锆石年龄及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2001, 17(2): 215-221. [Wu Cailai, Ireland T, Wooden J, et al. Zircon SHRIMP ages of Aolaoshan granite from the south margin of Qilianshan and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(2): 215-221.]
- 37 陈能松,何蕾,王国灿,等. 东昆仑造山带早古生代变质峰期和逆冲构造变形年代的精确限定 [J]. *科学通报*, 2002, 47(8): 628-631. [Chen Nengsong, He Lei, Wang Guocan, et al. Precise timing of the Early Paleozoic metamorphism and thrust deformation in the eastern Kunlun Orogen [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(8): 628-631.]
- 38 王惠初,陆松年,莫宣学,等. 柴达木盆地北缘早古生代碰撞造山系统 [J]. *地质通报*, 2005, 24(7): 603-612. [Wang Huichu, Lu Songnian, Mo Xuanxue, et al. An Early Paleozoic collisional orogen on the northern margin of the Qaidam Basin, northwestern China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(7): 603-612.]
- 39 郝国杰,陆松年,辛后田,等. 青海都兰地区前泥盆纪古陆块的物质组成和重大地质事件 [J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2004, 34(4): 495-501. [Hao Guojie, Lu Songnian, Xin Houtian, et al. The constitution and importance geological events of Pre-Devonian in the Dulan, Qinghai [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2004, 34(4): 495-501.]
- 40 郝国杰,陆松年,王惠初,等. 柴达木盆地北缘前泥盆纪构造格架及欧龙布鲁克古陆块地质演化 [J]. *地学前缘*, 2004, 11(3): 115-122. [Hao Guojie, Lu Songnian, Wang Huichu, et al. The Pre-Devonian tectonic framework in the northern margin of Qaidam Basin and geological evolution of Olongbuluck palaeo-block [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(3): 115-122.]
- 41 李惠民,陆松年,郑健康,等. 阿尔金山东端花岗岩片麻岩中 3.6Ga 锆石的地质意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(8): 259-262. [Li Huimin, Lu Songnian, Zheng Jiankang, et al. Dating of 3.6 Ga zircons in Granite-Gneiss from the eastern Altyn Mountains and its geological significance [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, 20(8): 259-262.]
- 42 梅华林,于海峰,陆松年,等. 甘肃敦煌太古宙英云闪长岩: 单颗粒锆石 U—Pb 年龄和 Nd 同位素 [J]. *前寒武纪研究进展*, 1998, 21(2): 41-45. [Mei Hualin, Yu Haifeng, Lu Songnian, et al. Archean tonalite in the Dunhuang, Gansu province: Age from the U-Pb single zircon and Nd isotope [J]. *Progress in Precambrian Research*, 1998, 21(2): 41-45.]
- 43 李怀坤,陆松年,相振群,等. 北祁连山西段北大河岩群碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究 [J]. *地质论评*, 2007, 53(1): 132-140. [Li Huaikun, Lu Songnian, Xiang Zhenqun, et al. SHRIMP U-Pb geochronological research on detrital zircons from the Beidahe Complex-Group in the western segment of the North Qilian Mountains, Northwest China [J]. *Geological Review*, 2007, 53(1): 132-140.]

U-Pb Age of Detrital Zircons and Its Geological Significance from Maoniushan Formation in the Wulan County, Northern Margin of Qaidam Basin

FENG Qiao¹ QIN Yu¹ FU SuoTang³ LIU YiQun² ZHOU DingWu¹ MA DaDe³
WANG LiQun³ REN JunHu² WANG ChenYu¹

(1. College of Geological Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590;

2. Geology Department/State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069;

3. Qinghai Oilfield Branch PetroChina, Dunhuang, Dunhuang, Gansu 736202)

Abstract: This paper studied the age distribution of detrital zircons of sandstone in Maoniushan Formation of Upper Devonian of Wulan county from northern margin of Qaidam Basin using LA-ICP-MS U-Pb isotopic age of zircons. The results show that the detrital zircons of sandstone has a wide range of zircon age, which can be divided into 5 peak interval. This sequence of the strata possibly was deposited in the Late Devonian and not earlier than the end of Early Devonian according to the regional geological correlation and paleontological data. The age distribution of detrital zircons indicate that there may be events of five regional geological structure in this area, and the most prominent is the Early Paleozoic, followed by Neoproterozoic and Early Paleoproterozoic-Late New Archean, which imply that the three periods of metamorphism and magmatic activity is relatively active and provide the main source of zircon for this strata with a mixture of multi-source characteristics. The obtained age data indicate the multi-provenance of the sandstone. In addition, there are less Archean detrital zircon having a high degree of harmony, which has provided some basis for the possible existence of Archean old strata, but needs further research.

Key words: detrital zircons; U-Pb dating; tectonic events; Late Devonian; Maoniushan Formation; northern margin of Qaidam Basin

《沉积学报》开通微信公众平台

微信作为一种新型通信工具,首次将通信、社交及平台综合到一起,业已成为当前应用最广泛的移动互联网媒体。《沉积学报》2014年10月正式开通期刊微信公众平台,本刊借助微信这一优势,将期刊论文元数据导入微信管理后台,形成了具有学术期刊特色的互联网移动平台——《沉积学报》微站,其拥有一下功能:



1. 稿件查询:作者可随时查询稿件处理进度;
2. 网刊阅读:通过微站的当期目录、过刊目录、论文检索等功能,读者可选择多种浏览模式进行摘要和 HTML 全文浏览;
3. 引用排行:可查看本刊每年被引次数前 10 名论文名单;
4. 动态信息:可及时了解本刊发布的重要信息;
5. 通过回复功能,为作者、读者、编者三者之间搭建了信息交流及共享的平台。

《沉积学报》微站的开通,不仅拓展了本刊学术交流的窗口,也为互联网在本刊的应用上开辟了一条新渠道,欢迎关注。