

柴达木盆地北缘牦牛山组物源分析 及其构造意义

张春宇^{1,2)}, 赵越²⁾, 刘金³⁾, 代昆^{2,4)}, 郑策²⁾

1) 中国石油勘探开发研究院, 北京, 100083; 2) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081;
3) 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛, 266555; 4) 大港油田 勘探开发研究院, 天津, 300280

内容提要:柴达木盆地北缘牦牛山组为一套由砂砾岩组成的陆相紫红色粗碎屑沉积岩,其时代一直存在争议。本文对两个剖面牦牛山组的沉积特征、古水流、砾石成分进行了研究,并对砂质充填物中锆石进行了 LA-ICP-MS 测年分析。结果表明,牦牛山组发育冲击扇沉积,古流向主要为自北西至南东和自南东至北西两个方向。两个剖面砾石成分差异显著,城墙沟剖面砾石成分以碳酸盐岩为主,而旺尕秀剖面砾石成分则较为复杂。砂质充填物中碎屑锆石 U-Pb 年龄可分为 3 个组:360~560Ma、890~1050Ma 和 2200~2500Ma。它们代表本区 3 次构造事件,包括早古生代柴达木盆地北缘由洋-陆至陆-陆的碰撞过程,新元古代 Grenville 造山事件及新太古代陆壳的增长。其中最小的碎屑锆石 U-Pb 年龄为 365 ± 3 Ma,结合区域地质背景与古生物等资料,表明牦牛山组的时代为晚泥盆世。本区早古生代第三期和第四期花岗岩类的锆石 U-Pb 年龄与本文最年轻的一组锆石 U-Pb 年龄在误差范围内一致,表明这两期岩体发生了快速抬升剥蚀。结合前人研究,柴达木盆地北缘在牦牛山组沉积期处于后碰撞阶段。

关键词:柴达木盆地北缘;牦牛山组;物源分析;锆石 U-Pb 测年

陆源碎屑是各物源区物质的混合物,保存了重要的物源区信息。物源分析是沉积盆地分析的重要一环,但不止限于沉积盆地,还对造山带的研究起到重要的作用。沉积地层中所保存的碎屑锆石来源广泛,抗剥蚀能力强。在缺乏生物地层等其他定年手段的情况下,对沉积层内碎屑锆石进行 U-Pb 定年能够很好地限定地层的最大沉积时代,同时还可以起到约束物源区并提供大区构造岩浆活动和造山带演化等方面的信息 (Zhao Hongge et al., 2003; Xu Yajun et al., 2007; Chen Wen et al., 2011; Li Zhong et al., 2013; Gehrels, 2014)。

柴达木盆地北缘超高压变质带是我国、同时也是世界上典型的加里东期造山带,是大陆地壳深俯冲的产物。该区及邻区在漫长的地史发展过程中,经历了五台期—喜马拉雅期等多次地质构造事件的作用。其中牦牛山组自 20 世纪 50 年代建组以来,其沉积时代一直存在争议,共有 4 种不同的观点:①

晚志留世—早泥盆世 (Xia Wenjing., 2014); ②晚泥盆世 (Wang Xunlian et al., 2002; Ren Junhu, 2010; Yang Chao, 2010; Feng Qiao et al., 2015); ③早石炭世 (Shi Xide, 1979); ④晚泥盆世—早石炭世 (Sun Chongren et al., 1997)。本文通过对柴达木盆地北缘牦牛山组的沉积记录、物源分析及其中碎屑锆石年代学分析,探讨了牦牛山组的沉积时代、物源及柴北缘在其沉积期所处的构造背景。

1 区域地质背景

柴达木东北部地区是中央造山带的重要组成部分,同时也是青藏高原的重要组成部分,经历了多期复杂的构造演化过程。新元古代—古生代特提斯构造域多旋回的板块离散、洋陆俯冲—陆陆碰撞等增生拼贴事件对柴达木东北部地区影响极大。近几十年来,围绕着柴北缘构造带的盆地结构、造山作用、岩浆—变质活动、物源组成、HP/UHP 变质岩的形成—

注:本文为中国地质调查局地质调查项目(编号 1212011120964)资助成果。

收稿日期:2018-05-06;改回日期:2018-10-25;网络发表日期:2018-11-30;责任编辑:周健。

作者简介:张春宇,男,1990 年生。博士,主要从事沉积大地构造、原型盆地恢复等研究。Email: zcy21_jobs@163.com。通讯作者:赵越,男,1955 生。研究员,博士生导师,主要从事构造事件的年代学、区域构造地质研究工作。Email: yue_zhao@cags.ac.cn。

引用本文:张春宇, 赵越, 刘金, 代昆, 郑策. 2019. 柴达木盆地北缘牦牛山组物源分析及其构造意义. 地质学报, 93(3):712~723, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019038.
Zhang Chunyu, Zhao Yue, Liu Jin, Dai Kun, Zheng Ce. 2019. Provenance analysis of the Maoniushan Formation in the North Qaidam basin and its tectonic significance. Acta Geologica Sinica, 93(3):712~723.

折返以及构造旋回等问题,前人开展了一系列的工作(Shi Dexi et al., 1979; Sun Chongren et al., 1997; Lu Songnian et al., 2002; Wang Xunlian et al., 2002; Dai Junsheng et al., 2003; Shi Rendeng et al., 2004; Wang Huichu et al., 2006; Chen Danling et al., 2007; Song Shuguang et al., 2012; Feng Qiao et al., 2015)。研究区位于柴达木盆地北缘东部德令哈境内,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,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、达肯大坂山、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。

柴达木盆地北缘前寒武纪地层主要出露有古元古界达肯大坂岩群、中元古界万洞沟群、沙柳河岩群和新元古界全吉群,早古生代地层主要为滩间山群。达肯大坂岩群原意包含了变质程度不同的表壳岩和时代迥然不同的变质深成侵入体。Lu Songnian et al. (2002)对其重新厘定后,将其限定为一套中至高级变质、并以副变质岩为主的表壳岩系统。属古元古代中晚期。万洞沟群以绢云母片岩、千枚岩、硅质条带结晶灰岩等为主,多呈断块产出,顶底不全。沙

柳河岩群由乌龙滩岩组和角闪岩岩组组成,是一套以大理岩、石英颗粒、含石榴石片岩和少量榴辉岩共生的表壳岩系,主体由成熟度较高的陆源碎屑岩和碳酸盐岩变质而成,其中含有较多的榴辉岩构造透镜体(Xin Houtian et al., 2004)。全吉群主要是一套未变质的砂岩、砾岩、石英颗粒、白云岩夹冰碛层的地层,中下部玄武岩中单颗粒锆石 U-Pb 年龄在 738Ma 左右,底界约为 800Ma(Li Huaikun et al., 2003)。早古生代滩间山群可分为 5 段,各段之间为整合接触关系,各岩段大多保存不全,段与段之间多为断层接触,上下级关系不明确,横向可对比性不强。滩间山群中玄武岩形成时限约在 510 ~ 460Ma,总体上具有岛弧火山岩性质。滩间山群形成不晚于早寒武世一中志留世(Wang Huichu et al., 2003; Li Feng et al., 2006)。牦牛山组为一套陆相火山岩-碎屑岩组合,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。

2 沉积特征

2.1 沉积相分析

本次研究的两个剖面位于欧龙布鲁克山和牦牛山(图 1)。它们分别属于欧龙布鲁克微陆块和滩间山岛弧构造带。

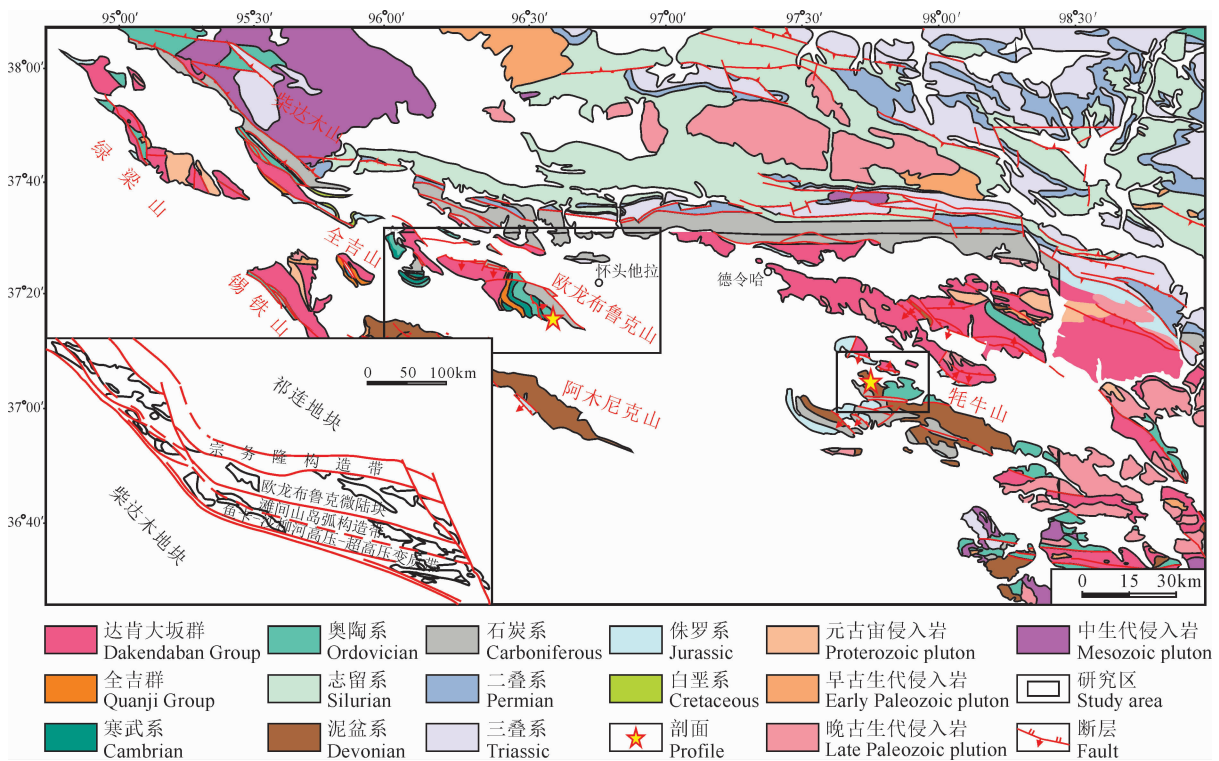


图 1 柴达木盆地北缘地质简图及剖面位置

Fig. 1 Simplified geological map of northern Qaidam basin and the location of profiles

欧龙布鲁克山所测城墙沟剖面地层上下接触关系清晰,牦牛山组分别与下伏奥陶系石灰沟组和上覆石炭系城墙沟组呈角度不整合接触关系(图 2a, 2b, 3A)。该剖面中牦牛山组厚度不大,约为 110m。其岩性主要为红色、紫红色砾岩和砂岩,表明沉积期沉积物处于氧化环境。下部不发育层理或发育块状层理,杂乱堆积,厚度约 20m。砾石为次棱角状一次圆状,大小混杂,形态多样,少量砾石呈直立状。砾石粒径最大约 35cm,最小约 2cm,平均约 12cm,主要为粗砾岩,成分成熟度低。垂向上,砾岩粒度总体显示逐渐变细的特征。整体上,该区牦牛山组下部砾岩为泥石流沉积,具有近源快速堆积的特征。中、上部发育连续多个正韵律的粒序层理,韵律底部具有滞留沉积特征的砾石,发育冲刷构造,砾石具有叠瓦状构造,向上逐渐过渡为含砾砂岩、粗砂岩和细砂岩,少见粉砂岩。砾石粒径最大约 14cm,最小约 0.5cm,明显小于下部砾岩段。整体上同样是由下自上粒度减小。

牦牛山地区旺尕秀剖面只发育牦牛山组,未见顶底(图 3B)。该剖面中牦牛山组为一套主要由砾岩、砂岩组成的陆相粗碎屑岩。前人将该区域牦牛山组分为三个沉积旋回(亚组),本次测量剖面未见上亚组的碎屑岩至火山岩沉积。中亚组下部为一套紫红色混杂堆积的砾岩段,厚约 173m,以中砾岩和

巨砾岩为主,砾石粒径在 1~50cm 之间,分选磨圆差,砾石成分复杂,发育块状层理或不发育层理。底部发育冲刷面,垂向上由下自上砾石粒度逐渐变小,整体上表现为冲击扇扇根亚相沉积。中亚组中部为一套紫红色砂砾岩段,厚约 215m,发育多个由细砾岩、粗砂岩至中细砂岩组成的正旋回,夹有薄层粗砾岩,每个旋回底部可见冲刷面,局部发育砂岩透镜体,砂岩中发育波痕和泥裂,中部表现为冲积扇扇中亚相沉积。中亚组上部主要发育紫红色粉砂岩和细砂岩,厚约 351m,节理发育。无明显沉积特征,可能被后期构造运动所改造。

2.2 古水流

通过测量沉积构造来恢复不同岩相形成时的古水流方向是确定可能物源区位置最直接和有效的方法,它们包括各种交错层理,叠瓦状扁平砾石、槽模、沟模等。如果测量的是线性沉积构造,如槽模或流动线理,那么当地层倾角 $<25^{\circ}$ 时,可以不进行矫正,因为地层低角度的倾斜不会对线性沉积构造所指示的古流向产生明显的影响。如果测量是面状构造,如交错层的前积层,那么当地层倾角 $>10^{\circ}$ 时,直接测量的面状构造所指示的流水方向与恢复后的面状构造所显示的流水方向将有较大的偏差。

本次研究对柴北缘地区 6 个出露牦牛山组的露头进行了野外调查,在此基础上选择了 2 条剖面进

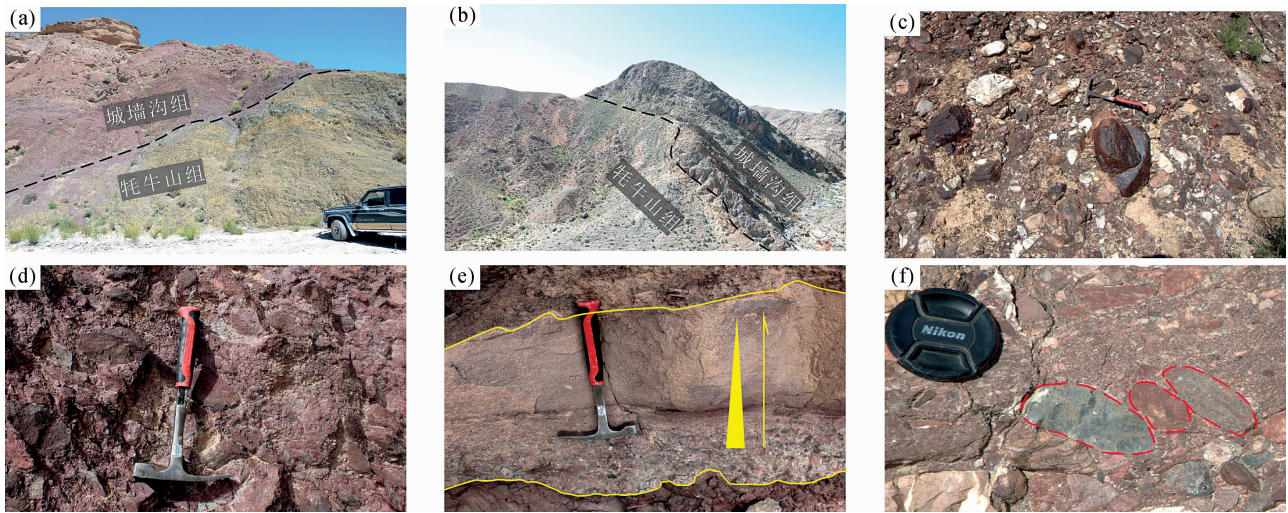


图 2 柴达木盆地北缘牦牛山组野外露头照片

Fig. 2 Photographs of outcrops of the Maoniushan Formation in northern Qaidam basin

(a) — 牦牛山组与下伏滩间山群之间角度不整合面; (b) — 牦牛山组与上覆城墙沟组的不整合; (c) — 旺尕秀剖面的复成分砾石; (d) — 城墙沟剖面的单成分(碳酸盐岩)砾石; (e) — 砂砾岩,垂向正粒序; (f) — 叠瓦状排列的砾石

(a) — Unconformity between the Maoniushan Formation and underlying Tanjianshan Group; (b) — unconformity between the Maoniushan Formation and overlying Chengqianggou Formation; (c) — polymictic conglomerate in Wanggaxiu profile; (d) — monomictic conglomerate (carbonate) in Chengqianggou profile; (e) — sand and conglomerate, normally graded bedding; (f) — imbricated pebbles

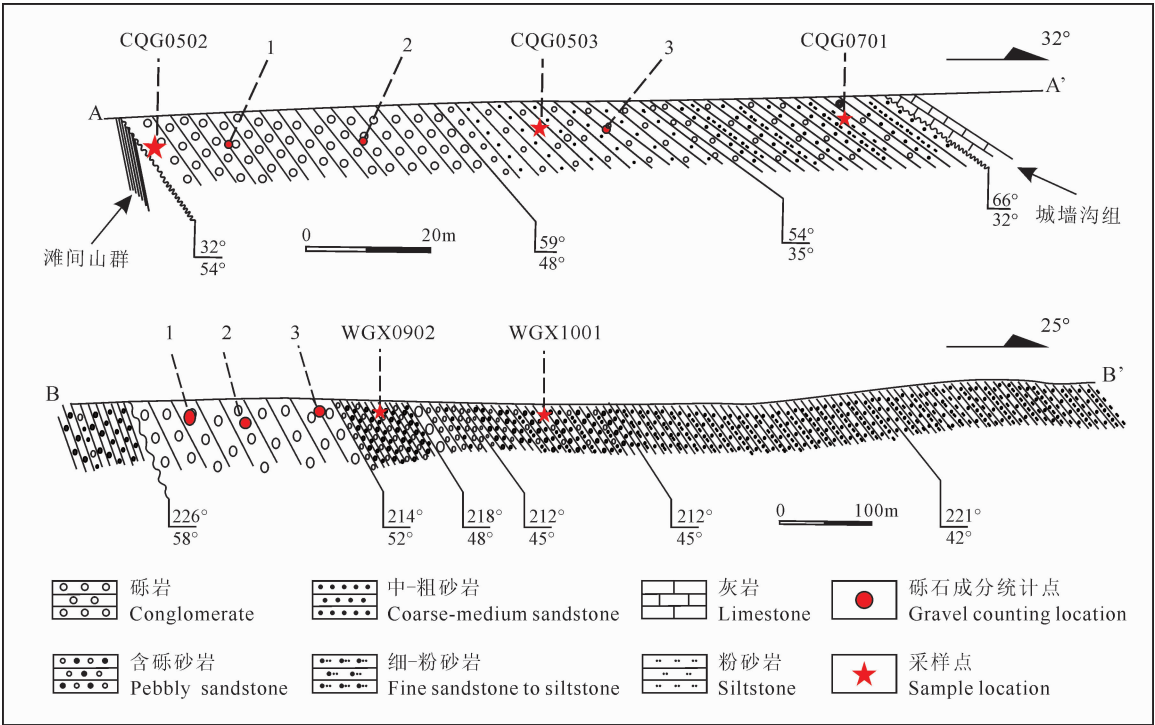


图 3 柴达木盆地北缘城墙沟(A—A')和旺尕秀(B—B')剖面图(剖面位置见图 1)

Fig. 3 Profiles of Chengqianggou (A—A') and Wangxixiu (B—B') in northern Qaidam basin (see location in Fig. 1)

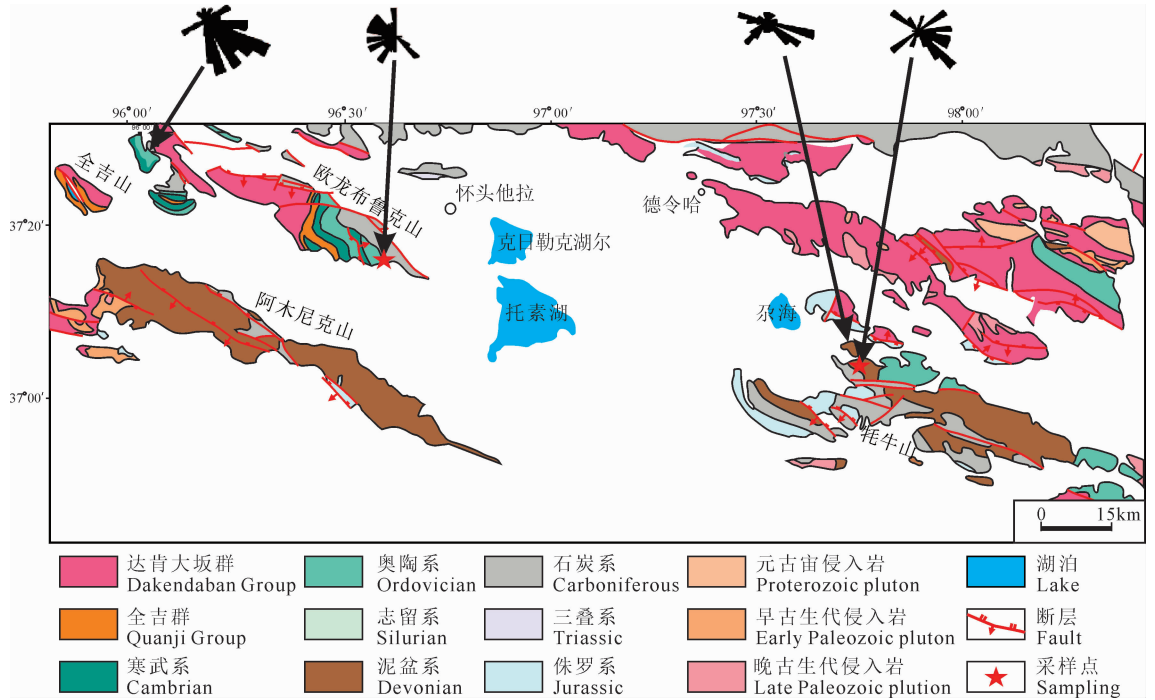


图 4 柴达木盆地北缘牦牛山组古流向玫瑰花图

Fig. 4 Paleocurrent map of the Maoniushan Formation in northern Qaidam basin

行野外实测,并进行了系统的采样。测量不同露头上砾石以及含砾砂岩中具有叠瓦状构造排列的砾石最大扁平面,并进行了系统测量和统计,每个点测量数在 20 个以上(图 4)。在室内将野外测量的数据

进行构造校正并投图,制成古水流玫瑰花图。结果表明,在欧龙布鲁克山地区,物源主要来自北西和南东方向。而在旺尕秀地区,物源同样主要来自北西和南东方向,少量来自北东方向。

2.3 砾石成分变化

与砂岩碎屑组分不同,砾岩的砾石成分与盆地周缘基底变质岩、岩浆岩以及沉积岩进行直接对比,因此根据砾石的岩性和成分可很容易确定它们可能的源区。盆地沉积层序中砾岩砾石成分的垂向变化与物源区岩石地层序列之间显示明显的反向关系,因此可以清楚地揭示物源区曾发生了削顶过程。本文在欧龙布鲁克和旺尕秀地区两个剖面共 6 个点的砾岩露头上,对 1~2m³ 范围内的长轴大于 1cm 以上的砾石进行了统计,以减小因粒度过小对岩性判断造成的影响。每个点的统计数量在 80 个以上(Hendrix et al., 1996; Hendrix., 2000; Liu Jian et al., 2012)。

表 1 城墙沟剖面砾石成分统计表
Table 1 Composition of conglomerate in the Chengqianggou profile

统计点	砾石岩性及个数			
	碳酸盐岩	碎屑岩	石英颗粒	片麻岩
1	14	70	5	1
2	63	40	44	5
3	86	15	8	0

表 2 旺尕秀剖面砾石成分统计表

统计点	砾石岩性及个数							
	碳酸盐岩	石英颗粒	碎屑岩	片麻岩	火山岩	花岗岩	大理岩	片岩及千枚岩
1	29	13	0	14	27	8	3	5
2	23	27	1	24	16	11	5	3
3	41	22	0	2	22	0	0	21

在欧龙布鲁克城墙沟剖面中,砾岩主要位于层位的中、下部,与奥陶系呈角度不整合的接触关系。野外统计表明,这一区域砾石成分较为简单,主要包括碎屑岩、碳酸盐岩、石英颗粒及片麻岩。垂向上砾石成分变化较大。由表 1 可知,由下自上,碎屑岩砾石数量逐渐减少,碳酸盐岩、石英颗粒砾石含量逐渐增加,片麻岩含量始终较少。这种特征表明,在欧龙布鲁克地区,牦牛山组主要由表壳岩被逐渐剥蚀而组成,深部基底物质并未被过多的剥蚀至地表。在旺尕秀剖面中,砾岩主要位于牦牛山组中段的下部。野外统计表明,这一区域砾石成分复杂,主要包括碳酸盐岩、石英颗粒、火山岩、片麻岩、大理岩、花岗岩及千枚岩和板岩(表 2)。垂向上,由下自上石英颗粒、片岩及千枚岩砾石逐渐增多,火山岩、大理岩、花岗岩、片麻岩砾石逐渐减少,碳酸盐岩砾石先减少后增加。这些特征表明,在旺尕秀地区,牦牛山组既有

表壳岩的组分,又有深部物质组分。

3 碎屑锆石

3.1 样品采集、制样与测试方法

本次一共选取了 5 件用于测年的样品,编号分别为 CQGL0502、CQGL0503、CQGL0701、WGXL0902 和 WGXL1001,分别采自柴达木北缘欧龙布鲁克山地区和牦牛山地区,均来自牦牛山组碎屑岩段。其中 CQGL0701 为粉砂岩,其余样品为砾石之间中粗砂质充填物。CQGL0502、CQGL0503 和 CQGL0701 的 GPS 坐标位置为 N37°15′6.49″、E96°35′51.19″,高程为 3310m, WGXL0902 和 WGXL1001 的 GPS 坐标位置为 N37°2′6.01″、E97°44′36.30″高程为 2995m,采样位置见图 4。

用于定年的锆石由河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司分选。锆石由标准的重矿物分离方法挑出,在双目镜下随机挑选>300 颗锆石粘在双面胶上,之后用无色透明的环氧树脂固定,等到环氧树脂固化后抛光,使之暴露,用于阴极发光(CL)及 LA-IPC-MS 分析,阴极发光图像由北京锆年领航公司拍摄完成(图 5)。锆石的原位 U-Pb 年龄测定是在西北大学大陆动力学实验室的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪上完成的。激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M,测试时激光束斑直径为 30μm,剥蚀深度为 20~40μm,激光脉冲为 10Hz,能量为 34~40mJ。电感耦合等离子体质谱仪为 Hewlett Packard 公司最新一代带有 Shield Torch 的 Agilent7500a ICP-MS。锆石 U-Pb 年龄的测定采用国际标准锆石 91500 为外标进行校正,每隔 6 个样品分析点测一次标准,保证和标样样品的条件完全一致。在 12 次锆石的分析前后测 2 次 NIST610,以 SiO₂ 含量为内标测定锆石中 U、Th 和 Pb 的含量,锆石的微量元素含量计算、同位素数据处理和年龄计算采用 Glitter 程序,普通铅校正采用 Anderson 的方法,年龄计算使用 Isoplot 4.0 版程序,详细分析步骤和数据处理方法见参考文献(Yuan Honglin et al., 2003)。根据碎屑锆石的年龄范围,对>1000Ma 的样品,由于含大量放射性成因 Pb,因而采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表面年龄,对于<1000Ma 的样品,由于可用于测量的放射性成因 Pb 含量较低和普通 Pb 校正的不确定性,因而采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄。

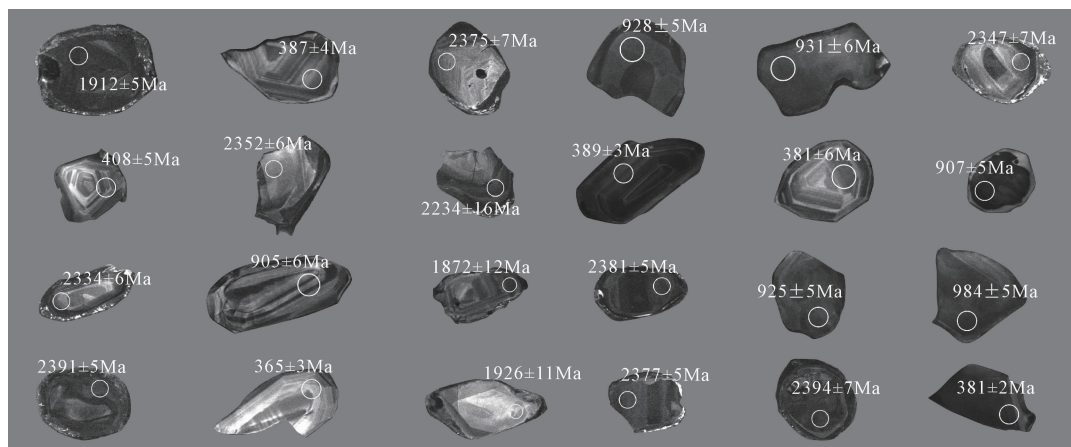


图 5 牦牛山组样品典型碎屑锆石阴极发光图像

Fig. 5 The CL images of representative detrital zircons in sandstone samples of the Maoniushan Formation

3.2 测试结果

样品 CQGL0502 共测试了 84 个点,得到 65 组有效数据,多数分析点沿谐和线及其附近分布。年龄变化于 365~3343Ma,主体年龄可分为 365~518Ma、907~1170Ma、1622~1737Ma、1954~2513Ma 四个区间,其他年龄相对分散(图 6a)。样品 Th 和 U 含量分别为 10.39×10^{-6} ~ 1176.19×10^{-6} 和 21.57×10^{-6} ~ 2773.84×10^{-6} ,Th/U 比值介于 0.03~3.03。

样品 CQGL0503 共测试了 83 个点,得到 80 组有效数据,大多数分析点沿谐和线及其附近分布。年龄变化于 522~3342Ma,主体年龄可分为 522~661Ma、796~1770Ma 和 2434~2632Ma 三个区间,其他年龄相对分散(图 6b)。样品 Th 和 U 含量分别为 8.56×10^{-6} ~ 426.27×10^{-6} 和 23.49×10^{-6} ~ 878.1×10^{-6} ,Th/U 比值介于 0.08~3.88。

样品 CQGL0701 共测试了 24 个点,得到 21 组有效数据,大多数分析点沿谐和线及其附近分布。年龄变化于 381~1712Ma(图 6c)。样品 Th 和 U 含量分别为 58.28×10^{-6} ~ 481.26×10^{-6} 和 61.46×10^{-6} ~ 736.51×10^{-6} ,Th/U 比值介于 0.29~2.59 之间。

样品 WGXL0902 共测试了 84 个点,得到 67 组有效数据,多数分析点沿谐和线及其附近分布。年龄变化于 1691~2510Ma,主体年龄可分为 1910~1947Ma、2102~2129Ma、2269~2454Ma 三个区间,其他年龄相对分散(图 6d)。样品 Th 和 U 含量分别为 2.62×10^{-6} ~ 366.61×10^{-6} 和 70.44×10^{-6} ~ 709.52×10^{-6} ,Th/U 比值介于 0.03~1.76 之间。

样品 WGXL1001 共测试了 84 个点,得到 76 组

有效数据,多数分析点沿谐和线及其附近分布。年龄变化于 438~3031Ma。其中 33 颗碎屑锆石组成了一个明显的主峰,峰值年龄为 2352Ma,另还有两个次要的峰值,其他年龄较为分散(图 6e)。锆石 Th 和 U 含量分别为 21.57×10^{-6} ~ 1112.59×10^{-6} 和 40.71×10^{-6} ~ 3144.16×10^{-6} ,Th/U 比值介于 0.05~1.38 之间。

4 讨论

4.1 牦牛山组沉积时代

牦牛山组原属城墙沟组,是其最下部的砂砾岩段,组名由青海第一区调队在 1976 年正式命名,标准剖面位于牦牛山。在距离建组剖面 2~3km 处的另一剖面相当层位发现植物化石 *Leptophloeum rhombicum*。由于长期缺乏同位素年代学的资料,故该层时代一直处于争议之中。目前共存在 4 种观点:①Yu Jianzhang and Lin Yingyang. (1961)认为城墙沟组下部的砂砾岩(即牦牛山组)与上部灰岩存在一个平行不整合面。青海地层表编写组主要依据植物化石 *Leptophloeum rhombicum*,Wang Xunlian et al. (2002)认为牦牛山组可能为全球海平面下降时期的沉积,三者均认为牦牛山组属于晚泥盆世。近年来,Ren Junhu(2010)、Feng Qiao et al. (2015)由其中碎屑锆石均获得牦牛山组最大年龄为早泥盆世,结合区域地质及化石证据同样认为牦牛山组属晚泥盆世;②Shi Xide(1979)根据岩石特征及沉积特征,认为牦牛山组的沉积期应为杜内早期或早杜内晚期,即属于下石炭统,青海省区域地质志根据牦牛山组上部孢粉组合得出同样的结论;③青海省岩石地层编写组由在扎布萨尔秀东部发现的腕足类

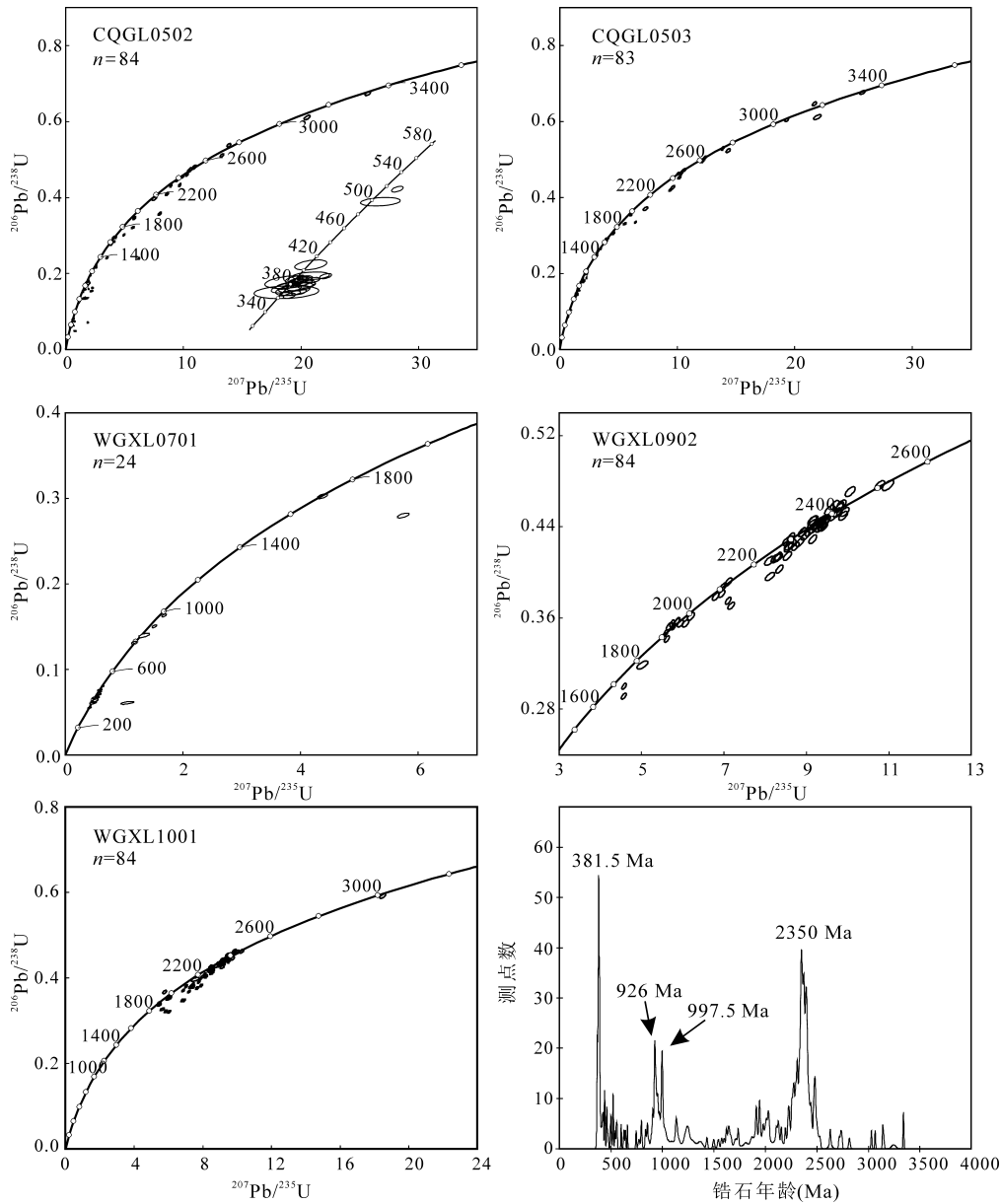


图 6 牦牛山组各样品碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图与年龄频率图

Fig. 6 U-Pb concordia diagram of detrital zircons and histograms of detrital zircon U-Pb ages

Megachometes sp. 和在大冰沟发现的含有杜内期腕足类 *Eochoristites leei*, *CaMarotoecharinlingensis* 等, 认定牦牛山组是一个穿时地层(晚泥盆世—早石炭世); ④Xia Wenjing (2014) 分别对牦牛山地区牦牛山组内火山岩、砂岩及花岗岩砾石进行了锆石 U-Pb 的测定, 分别获得了 $429.1 \pm 3.9\text{Ma}$ 的下限年龄和 $371 \pm 13\text{Ma}$ 的上限年龄。这些数据指出牦牛山组的沉积时代为晚志留世—早泥盆世。

本文对牦牛山组中砾岩的基质进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学测试, 其中样品 CQGL0502 来自地层最底部, 后又增加了一件粉砂岩样品

CQG0701(地层顶部)。其中最年轻的锆石形成于 $365 \pm 3\text{Ma}$ 。沉积地层中最年轻的碎屑锆石可能代表了地层的最大年龄, 并且区内地层并未发生倒转, 结合地层上下接触关系, 综合考虑前人古生物和同位素的研究成果, 本文认为牦牛山组的沉积时代为晚泥盆世。

4.2 物源分析

4 件砾岩基质样品的碎屑锆石的 U-Pb 年龄可分为 3 个主要年龄段(图 6f): 分别为 $360 \sim 560\text{Ma}$, 峰值为 381.5Ma ; $890 \sim 1050\text{Ma}$, 峰值为 926Ma 和 997.5Ma ; $2200 \sim 2500\text{Ma}$, 峰值为 2350Ma 。同时还存在多个次级峰值。

CL 图像显示 360~560Ma 这一年龄段的锆石多为棱角状一次棱角状,表明没有经历长距离搬运或多次再循环。大量研究表明,早古生代期间,柴北缘经历了由洋-陆俯冲 to 陆-陆俯冲的一系列过程,形成了柴北缘超高压变质带(UHP);其中包含多种高压/超高压岩石组合与多种类型的花岗岩(Hao Guojie et al., 2004; Wang Huichu et al., 2005; Song Shuguang, 2009; Yang Jingsui et al., 2009; Song Shuguang et al., 2014)。榴辉岩的锆石 U-Pb 年龄将俯冲时代限制在 470~420Ma 之间(Song Shuguang et al., 2005; Chen Danling et al., 2007)。早古生代各类花岗岩可分为 4 期 3 类,分别为:① 早中奥陶世(465~473 Ma);② 晚中奥陶世(440~446Ma);③ 晚志留世—早泥盆世(397~408Ma);④ 晚泥盆世(372~383Ma)。它们主要分布在赛什腾山、绿梁山、大柴旦、锡铁山、都兰野马滩等地(Wu Cailai et al., 2004, 2007, 2008, 2014; Yu Shengyao et al., 2011; Shao Pengcheng et al., 2018)。结合古水流、砾石信息可推断,欧龙布鲁克山地区牦牛山组这一年龄段的物源组主要来自 NW、SE 方向上的第四期(372~383Ma)花岗质岩浆作用;混合了少量第三期花岗岩浆作用的产物。

新元古代晚期组分为牦牛山组提供了重要的物质。Mattinson et al. (2006)采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年方法测得都兰地区野马滩附近的花岗片麻岩原岩年龄为 926.6 ± 6.9 Ma 和 921.4 ± 7.0 Ma。Song Shuguang et al. (2012)对鱼卡、锡铁山及都兰 3 个地区附近的花岗片麻岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄研究,其中都兰附近花岗片麻岩的年龄分别为 907 ± 18 Ma 和 936 ± 28 Ma(上交点年龄);锡铁山附近花岗片麻岩平均年龄为 951 ± 24 Ma 和 942 ± 16 Ma;鱼卡附近花岗片麻岩平均年龄为 976 ± 19 Ma 和 941 ± 21 Ma,由此认为花岗片麻岩的原岩形成于 910~1000Ma 年龄段内。Yu Shengyao et al. (2013)在鱼卡利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年方法获得云母片岩的变质年龄为 920 ± 18 Ma,在都兰地区利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年方法获得花岗片麻岩的形成年龄为 910 ± 2 Ma。上述研究表明柴北缘新元古代存在重要的岩浆事件和变质事件,其中很多花岗片麻岩和泥质片麻岩形成于活动大陆边缘,为早古生界高压/超高压变质岩的原岩。阿尔金-祁连-柴北缘这一期构造事件可与杨子陆块对比,响应全球 Grenville 造山事件(Song Shuguang et al., 2012; Yu Shengyao et al., 2013)。阴极发光

图像显示碎屑锆石岩浆核外部多具有变质环带,其 U-Pb 年龄与该区识别出的正、副片麻岩锆石 U-Pb 年龄一致,表明新元古界是牦牛山组的物源之一。

古元古代晚期的物质同样为牦牛山组提供了重要的物源。Lu Songnian et al. (2002)将原先的达肯大坂群重新厘定之后,根据达肯大坂岩群与德令哈杂岩中的花岗片麻岩原岩互为侵入接触关系及侵入于达肯大坂岩群的钾长石花岗伟晶岩结晶年龄,重新厘定了达肯大坂岩群形成时代约在 2.34~2.47Ga,指示了欧龙布鲁克微陆块在~2.5 Ga 的陆壳增生时间(Li Xiaoyan et al. 2007; Wang Huichu et al. 2006)。但 Huang Wan et al. (2011)的研究认为这个年龄段的锆石为继承锆石,不能代表达肯大坂岩群的年龄,并获得达肯大坂岩群 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 的年龄应在 1.96~2.19Ga 范围内。Gong Songlin et al. (2012)报道了全吉地块中莫河岩体、呼德生岩体和德令哈杂岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄在约 2.37~2.39Ga 范围内。另外,鱼卡-沙柳河岩群中的花岗片麻岩侵入体中也包含 2.4~2.5Ga 的继承锆石。故这一年龄段的物源可能来自上述物源区的混合。从图 6f 还可以看出在 1.91~2.05 Ga 之间约有 20 个测点,其中存在几个弱的尖峰。Zhang Lu (2014)指出,全吉陆块在约 2.2~1.8Ga 期间,发生了两侧碰撞变质作用:第一期时间约为 1.95~1.90Ga,第二期约在 1.85~1.83Ga 期间。故可能还有少量物质来自这一时期变质深熔作用的产物。

4.3 柴达木盆地北缘早古生代演化

野外观测表明,牦牛山组具有典型磨拉石建造的特征。在大煤沟剖面,可观察到下伏奥陶系暗色细粒浊积岩组成的复理石过渡到上覆牦牛山组紫红色粗碎屑组成的磨拉石,其间由一角度不整合面分隔。在城墙沟、旺尕秀、穿山沟等剖面,牦牛山组均显示出磨拉石建造的特征。古水流测量表明牦牛山组的物源主要来自于 NW 和 SE 两个方向,与柴北缘超高压带的走向近似平行。本次研究中两个剖面牦牛山组厚度、砾石成分和锆石年代学的分析不同表明它们主体的物源区是不同的,而两者古水流方向相似,说明了物源区剥蚀存在一定的差异性。

近年来的研究表明,柴北缘地区前寒武纪至古生代经历了多期构造事件,其中以早古生代高压—超高压变质作用事件最为显著。自约 540Ma 开始,南祁连洋开始向北俯冲,形成了一系列岛弧火山岩(Shi Rendeng et al., 2003, 2004)。接着在约 473~

420Ma, 柴北缘经历了如前所述的大洋俯冲到大陆俯冲的两个过程, 形成了正片麻岩、副片麻岩、少量榴辉岩及石榴橄榄岩透镜体等的岩石组合。第一期的超高压变质作用的时限约为 445~473Ma。大洋约在 440Ma 闭合, 在俯冲大洋岩石圈的拖拽下, 陆壳相撞并进一步向北俯冲发生第二期的超高压变质作用, 时限约为 438~420Ma。自 420Ma 开始至 360Ma 这一时期, 整个柴北缘地区处于后造山隆起阶段, 先期俯冲、受到超高压作用的板片拆返至地壳较浅部位, 导致原来未受超高压变质作用的块体变得不稳定, 连同岩石圈的伸展作用, 导致大量火山活动, 形成大量 S 型和 I 型的花岗岩类侵入体 (Wu Cailai et al., 2004, 2007, 2008, 2014)。这一阶段的花岗岩侵入体形成于俯冲/碰撞造山后应力释放的伸展环境, 大量粗粒沉积物迅速堆积, 形成牦牛山组磨拉石建造。锆石 U-Pb 年龄表明牦牛山组很大一部分物质来自于这些花岗岩侵入体, 表明这一期侵位的花岗岩体发生了快速冷却过程并迅速被剥露出地表, 柴北缘自 420Ma 之后从挤压转为板内伸展。综合研究表明, 柴北缘在牦牛山组沉积期处于后碰撞阶段, 造山带在该时期可能已经垮塌。

5 结论

牦牛山组为一套紫红色冲击扇沉积, 发育扇跟、扇中和扇缘。古流向主要为自北西向南东和自东南向北西两个方向。其中砾石成分在两个剖面不同, 城墙沟剖面以表壳岩(碳酸盐岩)为主, 成分相对单一, 旺尕秀剖面砾石成分相对复杂, 包括火山岩, 变质岩和沉积岩, 深部物质含量较高。

本文对牦牛山组 4 个砂质充填物和一个粉砂岩样品进行了 LA-ICP-MS 测年, 其中最年轻的锆石 U-Pb 年龄为 365 ± 3 Ma, 结合前人古生物等方面的研究, 认为牦牛山组的沉积时代为晚泥盆世。碎屑锆石 U-Pb 年龄主要包含 360~560Ma、890~1050Ma 和 2200~2500Ma 三个年龄区间, 表明古元古界、新元古界和早古生界是牦牛山组最主要的 3 个物源。与本区三次重大的构造事件有着良好的对应关系。

柴达木盆地北缘早古生代花岗质岩浆可分为 4 期, 分别为 465~473Ma、440~446Ma、397~408Ma 和 372~383Ma, 其中第三期和第四期花岗岩与本文 381.5Ma 的碎屑锆石 U-Pb 年龄峰值相近, 表明这两期岩体经历了快速的剥露; 结合古水流及奥陶系—泥盆系整体一套复理石—磨拉石的沉积组合和

区域演化特征, 表明牦牛山组沉积期时柴达木盆地北缘处于后碰撞阶段, 柴达木盆地北缘造山带可能已经垮塌。

References

- Chen Danling, Sun Yong, Liu Liang. 2007. The metamorphic ages of the country rocks of the Yukahe eclogites in the northern margin of Qaidam basin and its geological significance. *Earth Science Frontiers*, 14(1):108~116 (in Chinese with English abstract).
- Chen Wen, Wan Yusheng, Li Huaqin, Zhang Zongqing, Dai Tanmo, Shi Enze, Sun Jingbo. 2011. Isotope geochronology: Technique and application. *Acta Geologica Sinica*, 85(11):1917~1947 (in Chinese with English abstract).
- Dai Junsheng, Ye Xingshu, Tang Liangjie, Jin Zhijun, Shao Wenbin, Hu Yong, Zhang Bingshan. 2003. Tectonic units and oil-gas potential of the Qaidam basin. *Chinese Journal of Geology*, 38(3):291~296 (in Chinese with English abstract).
- Feng Qiao, Qin Yu, Fu Suotang, Liu Yiqun, Zhou Dingwu, Ma Dade, Wang Liqun, Ren Junhu, Wang Chenyu. 2015. U-Pb age of detrital zircons and its geological significance from Maoniushan Formation in the Wulan County, northern margin of Qaidam basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(3):486~499 (in Chinese with English abstract).
- Gehrels G. 2014. Detrital zircon U-Pb geochronology applied to tectonics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42:127~149.
- Gong Songlin, Chen Nengsong, Wang Qinyan, Kusky T M, Wang Lu, Zhang Lu, Ba Jin, Liao Fanxi. 2012. Early Paleoproterozoic magmatism in the Quanji massif, northeastern margin of the Qinghai-Tibet plateau and its tectonic significance: LA-ICPMS U-Pb zircon geochronology and geochemistry. *Gondwana Research*, 21(1):152~166.
- Hao Guojie, Lu Songnian, Wang Huichu, Xin Houtian, Li Huaikun. 2004. The Pre-Devonian tectonic framework in the northern margin of Qaidam basin and geological evolution of Olongbuluck palaeo-block. *Earth Science Frontiers*, 11(3):115~122 (in Chinese with English abstract).
- Hendrix M S. 2000. Evolution of Mesozoic sandstone compositions, southern Junggar, northern Tarim, and western Turpan basins, northwest China: A detrital record of the ancestral Tian Shan. *Journal of Sedimentary Research*, 70(3):520~532.
- Hendrix M S, Graham S A, Amory J Y, Badarch G. 1996. Noyon Uul (King Mountain) syncline, southern Mongolia: Early Mesozoic sedimentary record of the tectonic amalgamation of central Asia. *Geological Society of America Bulletin*, 108:1256~1274.
- Huang Wan, Zhang Lu, Ba Jin, Liao Fanxi, Chen Nengsong. 2011. Detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb dating for K-feldspar leptyte of Quanji massif in the north margin of Qaidam block: constraint on the age of Dakendaban Group. *Geological Bulletin of China*, 30(9):1354~1359 (in Chinese with English abstract).
- Li Feng, Wu Zhiliang, Li Baozhu, Wang Linfeng. 2006. Revision of the Tanjianshan Group on the northern margin of the Qaidam basin. *Northwestern Geology*, 39(3):83~90 (in Chinese with English abstract).
- Li Huaikun, Lu Songnian, Wang Huichu, Xiang Zhenqun, Zheng Jiankang. 2003. Record of break-up of the supercontinent in the Neoproterozoic in North Qaidam, Qinghai. *Geological Survey and Research*, 26(1):27~37 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaoyan, Chen Nengsong, Xia Xiaoping, Sun Min, Xu Ping, Wang Qinyan, Wang Xinyu. 2007. Constrains on timing of the early-Paleoproterozoic Magmatism and crustal evolution of the Oulongbuluke microcontinent: U-Pb and Lu-Hf isotope systematics of zircons from Mohe granitic pluton. *Acta*

- Petrologica Sinica, 23(2):513~522 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhong, Xu Jianqiang, Gao Jian. 2013. Basin range systems sedimentology and case studies in North China and Tarim areas, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(5):757~772 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jian, Zhao Yue, Liu Xiaoming, Wang Yu, Liu Xiaowen. 2012. Rapid exhumation of basement rocks along the northern margin of the North China craton in the early Jurassic: evidence from the Xiabancheng basin, Yanshan tectonic belt. *Basin Research*, 24(5):544~558.
- Lu Songnian, Wang Huichu, Li Huaikun, Yuan Guibang, Xin Houtian, Zheng Jiankang. 2002. Redefinition of the "Dakendaban Group" on the northern margin of the Qaidam basin. *Geological Bulletin of China*, 21(1):19~23 (in Chinese with English abstract).
- Mattinson C G, Wooden J L, Liou J G, Bird D K, Wu Cailai. 2006. Geochronology and tectonic significance of Middle Proterozoic granitic orthogneiss, North Qaidam HP/UHP terrane, western China. *Mineralogy and Petrology*, 88(1-2):227~241.
- Ren Junhu. 2010. A study on tectonic evolution during the period of Nanhua to Devonian at the north and south of Qaidam basin. PhD thesis of Northwest University (in Chinese with English abstract).
- Shao Pengcheng, Chen Shiyue, Sun Jiaopeng, Ma Shuai, Liu Jin, Wang Feng. 2018. ? SHRIMP zircon U-Pb dating and petrogeochemistry of Aolaoshan gabbro-diorite in the western north margin of Qaidam Basin. *Acta Geologica Sinica*, 92(9):1888~1903 (in Chinese with English abstract).
- Shi Rendeng, Yang Jingsui, Wu Cailai. 2003. The discovery of adakitic dacite in Early Palaeozoic island arc volcanic rocks on the northern margin of Qaidam basin and its geological significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(3):229~236 (in Chinese with English abstract).
- Shi Rendeng, Yang Jingsui, Wu Cailai, Iizuka T, Hirata T. 2004. Island arc volcanic rocks in the North Qaidam UHP metamorphic belt. *Acta Geologica Sinica*, 78(1):52~64 (in Chinese with English abstract).
- Shi Xide. 1979. Discovery of Amunik stage in Northeast Qaidam—discussion on the division on Lower Carboniferous in Oulongbuluke. *Qinghai Geology*, (01):1~25 (in Chinese with English abstract).
- Song Shuguang, Zhang Lifei, Niu Yaoling, Su Li, Jian Ping, Liu Dunyi. 2005. Geochronology of diamond-bearing zircons from garnet peridotite in the North Qaidam UHPM belt, northern Tibetan Plateau: a record of complex histories from oceanic lithosphere subduction to continental collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 234(1):99~118.
- Song Shuguang, Niu Yaoling, Zhang Lifei, Zhang Guibin. 2009. Time constraints on orogenesis from oceanic subduction to continental subduction, collision, and exhumation: An example from North Qilian and North Qaidam HP-UHP belts. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9):2067~2077 (in Chinese with English abstract).
- Song Shuguang, Su Li, Li Xianhua, Niu Yaoling, Zhang Lifei. 2012. Grenville-age orogenesis in the Qaidam-Qilian block: The link between South China and Tarim. *Precambrian Research*, 22:9~22.
- Song Shuguang, Niu Yaoling, Su Li, Zhang Cong, Zhang Lifei. 2014. Continental orogenesis from ocean subduction, continent collision/subduction, to orogen collapse, and orogen recycling: The example of the North Qaidam UHPM belt, NW China. *Earth-Science Reviews*, 129:59~84.
- Sun Chongren, Chen Guorong, Li Zhangrong. 1997. *Lithology of Qinghai*. Beijing: Geological Publishing House.
- Wang Huichu. 2006. Early Paleozoic collisional orogeny and magmatism on northern margin of the Qaidam basin. PhD thesis of China University of Geoscience (in Chinese with English abstract).
- Wang Huichu, Lu Songnian, Yuan Guibang, Xin Houtian, Zhang Baohua, Wang Qinghai, Tian Qi. 2003. Tectonic setting and age of the "Tanjianshan Group" on the northern margin of the Qaidam basin. *Geological Bulletin of China*, 22(7):487~493 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huichu, Lu Songnian, Mo Xuanxue, Xin Houtian. 2005. An Early Paleozoic collisional orogen on the northern margin of the Qaidam basin, northwestern China. *Geological Bulletin of China*, 24(7):603~612 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huichu, Li Huaikun, Lu Songnian, Yuan Banggui, Xin Houtian. 2006. Geological characteristics and tectonic setting of the Dakendaban Group in Iq area, northern margin of Qaidam basin. *Geological Survey Research*, 29(4):253~262 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xunlian, Gao Jinhan, Zhang Haijun, Liu Xudong, Yang Ping, Ma Zhiqiang. 2002. Recognition of the top and base boundaries of the Carboniferous System in the northern margin of the Qaidam basin. *Earth Science Frontiers*, 9(3):65~72 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Wooden J L, Ireland T, Li Haibing, Shi Rendeng, Meng Fancong, Chen Songyong, Persing H. 2004. Granitic magmatism on the Early Paleozoic UHP belt of northern Qaidam, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 78(5):658~674 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Gao Yuanhong, Wu Suoping. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granites from the Da Qaidam area in the north margin of Qaidam basin, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8):1861~1875 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Gao Yuanhong, Wu Suoping, Chen Qilong, Wooden J L, Mazadab F, Mattinson C. 2008. SHRIMP U-Pb dating of grannites in western of North Qaidam and its geochemical characteristics. *Science in China (Series D)*, 38(8):930~949 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Gao Yuanhong, Li Zhaoli, Lei Min, Qin Haipeng, Li Mingze, Liu Chunhua, Frost R B, Robinson P T, Wooden J L. 2014. SHRIMP U-Pb dating of granites from Dulan and geochronology of Paleozoic granites in UHP belt of North Qaidam. *Scientia Sinica (Terrae)*, 44(10):2142~2159 (in Chinese with English abstract).
- Xia Wenjing. 2014. Sedimentary facies, formation age and tectonic setting of Maoniushan Formation along the North margin of Qaidam terrane. Master thesis of Hefei University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Xin Houtian, Zhou Shijun, Wang Huichu, Hao Guojie, Chen Nengsong, Han Yingshan. 2004. On reuse of 'Shaliuhe Group' in the northern margin of Qaidam basin. *Northwest Geology*, 37(1):26~33.
- Xu Yajun, Du Yuansheng, Yang Jianghai. 2007. Prospects of sediment provenance analysis. *Geological Science and Technology Information*, 26(3):26~32 (in Chinese with English abstract).
- Yang Chao. 2010. Tectonic and exploration prospect in Carboniferous of Qaidam basin. PhD thesis of China University of Petroleum (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Zhang Jianxin, Zhang Ceming, Liu Fulai, Wu Cailai. 2009. Tectonic setting of main high-and ultrahigh-pressure metamorphic belts in China and adjacent region and discussion on their subduction and exhumation mechanism. *Acta Petrologica Sinica*, 25(7):1529~1560 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jianzhang, Lin Yingyang. 1961. Stratigraphic correlation of the Early Carboniferous on the North and South slope of Qilian orogeny: evidence from the coral fossil. *Acta Geologica Sinica*, 41(2):154~173 (in Chinese with English abstract).
- Yu Shengyao, Zhang Jianxin, Pablo G del Rial, Zhao Xilin, Hou Kejun, Gong Jianghua, Li Yunshuai. 2013. The Grenvillian orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam mountain belts of northern Tibet Plateau: Constraints from geochemical and

- zircon U-Pb age and Hf isotopic study of magmatic rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 73:372~395.
- Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, Liu Xiaoming, Xu Ping, Sun Deyou. 2003 LA-ICP-MS U-Pb dating and rare earth element analysis of Cenozoic pluton rocks in Northeast China. *Chinese Science Bulletin*, 48(14):1511~1520 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lu. 2009. Petrogenesis of the (meta-) Precambrian clastic sedimentary rock from the Quanji massif, northwestern China and tectonic implications. PhD thesis of China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zhao Hongge, Liu Chiyang. 2003. Approaches and prospects of provenance analysis. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(3):409~415 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 陈丹玲,孙勇,刘良. 2007. 柴北缘鱼卡河榴辉岩围岩的变质时代及其地质意义. *地学前缘*, 14(1):108~116.
- 陈文,万渝生,李华芹,张宗清,戴檀谟,施泽恩,孙敬博. 2011. 同位素地质年龄测定技术及应用. *地质学报*, 85(11):1917~1947.
- 戴俊生,叶兴树,汤良杰,金之钧,邵文斌,胡勇,张兵山. 2003. 柴达木盆地构造分区及其油气远景. *地质科学*, 38(3):291~296.
- 冯乔,秦宇,付锁堂,柳益群,周鼎武,马达德,王立群,任军虎,王晨瑜. 2015. 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. *沉积学报*, 33(3):486~499.
- 郝国杰,陆松年,王惠初,辛后田,李怀坤. 2004. 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. *地学前缘*, 11(3):115~122.
- 黄婉,张璐,巴金,廖梵汐,陈能松. 2011. 柴达木地块北缘全吉地块钾长石浅粒岩碎屑锆石 LA-ICP-MSU-Pb 定年——对达肯大坂岩群时代的约束. *地质通报*, 30(9):1353~1359.
- 康玉柱. 2011. 柴达木盆地构造体系控油作用研究. 北京:地质出版社.
- 李峰,吴志亮,李保珠,汪林峰. 2006. 柴达木盆地北缘滩间山群新厘定. *西北地质*, 39(3):83~90.
- 李怀坤,陆松年,王惠初,相振群,郑建康. 2003. 青海柴北缘新元古代超大陆裂解的地质记录——全吉群. *地质调查与研究*, 26(1):27~37.
- 李晓彦,陈能松,夏小平,孙敏,徐平,王勤燕,王新宇. 2007. 莫河花岗岩的锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素研究:柴北欧龙布鲁克微陆块始古元古代岩浆作用年龄和地壳演化约束. *岩石学报*, 23(2):513~522.
- 李忠,徐建强,高剑. 2013. 盆山系统沉积学——兼论华北和塔里木地区研究实例. *沉积学报*, 31(5):757~772.
- 陆松年,王惠初,李怀坤,袁桂邦,辛后田,郑建康. 2002. 柴达木盆地北缘“达肯大坂群”的再厘定. *地质通报*, 21(1):19~23.
- 青海省地质矿产局. 1991. 青海省区域地质志. 北京:地质出版社.
- 任军虎. 2010. 柴达木盆地南、北缘南华—泥盆纪构造演化. 西北大学博士学位论文.
- 邵鹏程,陈世悦,孙娇鹏,马帅,刘金,汪峰. 2018. 柴达木盆地北缘西段噶喇山辉长闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及岩石地球化学特征. *地质学报*, 92(9):1888~1903.
- 施希德. 1979. 柴达木东北缘阿本尼克山杜内阶的发现——兼对欧龙布鲁克下石炭统划分的讨论. *青海地质*, (01):1~25.
- 史仁灯,杨经绥,吴才来. 2003. 柴北缘早古生代岛弧火山岩中埃达克质英安岩的发现及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 22(3):229~236.
- 史仁灯,杨经绥,吴才来, Iizuka T, Hirata T. 2004. 柴达木北缘超高压变质带中的岛弧火山岩. *地质学报*, 78(1):52~64.
- 宋述光,牛耀龄,张立飞,张贵宾. 2009. 大陆造山运动:从大洋俯冲到大陆俯冲、碰撞、折返的时限——以北祁连山、柴北缘为例. *岩石学报*, 25(9):2067~2077.
- 孙崇仁,陈国隆,李璋荣. 1997. 青海省岩石地层. 武汉:中国地质大学出版社.
- 王惠初. 2006. 柴达木盆地北缘早古生代碰撞造山及岩浆作用. 中国地质大学(北京)博士学位论文.
- 王惠初,陆松年,袁桂邦,辛后田,张宝华,王青海,田琪. 2003. 柴达木盆地北缘滩间山群的构造属性及形成时代. *地质通报*, 22(7):487~493.
- 王惠初,陆松年,莫宜学,李怀坤,辛后田. 2005. 柴达木盆地北缘早古生代碰撞造山系统. *地质通报*, 24(7):603~612.
- 王惠初,李怀坤,陆松年,袁桂邦,辛后田. 2006. 柴北缘鱼卡地区达肯大坂岩群的地质特征与构造环境. *地质调查与研究*, 29(4):253~262.
- 王勤燕,陈能松,李晓彦,郝爽,陈海红. 2008. 全吉地块基底达肯大坂岩群和热事件的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年. *科学通报*, (14):1693~1701.
- 王训练,高金汉,张海军,刘旭东,杨平,马志强. 2002. 柴达木盆地北缘石炭系顶、底界线再认识. *地学前缘*, 9(3):65~72.
- 吴才来,杨经绥,许志琴, Wooden J L, Ireland T, 李海兵, 史仁灯, 孟繁聪, 陈松永, Persing H. 2004. 柴达木盆地北缘古生代超高压带中花岗岩岩浆作用. *地质学报*, 78(5):658~674.
- 吴才来,邵源红,吴锁平. 2007. 柴达木盆地北缘大柴旦地区古生代花岗岩锆石 SHRIMP 定年. *岩石学报*, 23(8):1861~1875.
- 吴才来,邵源红,吴锁平,陈其龙, Wooden J, Mazadab F, Mattinson C. 2008. 柴北缘西段花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其岩石地球化学特征. *中国科学:D 辑*, 38(8):930~949.
- 吴才来,邵源红,李兆丽,雷敏,秦海鹏,李明则,刘春花, Frost R B, Robinson P T, Wooden J L. 2014. 都兰花岗岩锆石 SHRIMP 定年及柴北缘超高压带花岗岩年代学格架. *中国科学:地球科学*, 44(10):2142~2159.
- 夏文静. 2014. 柴北缘牦牛山组沉积环境、形成时代和形成大地构造背景. 合肥工业大学硕士学位论文.
- 辛后田,周世军,王惠初,郝国杰,陈能松,韩英善. 2004. 柴达木盆地北缘“沙柳河岩群”的重新启用. *西北地质*, 37(1):26~33.
- 徐亚军,杜远生,杨江海. 2007. 沉积物物源分析研究进展. *地质科技情报*, 26(3):26~32.
- 杨超. 2010. 柴达木盆地构造特征及石炭系勘探前景. 中国石油大学博士学位论文.
- 杨经绥,许志琴,张建新,张泽明,刘福来,吴才来. 2009. 中国主要高压-超高压变质带的大地构造背景及俯冲/折返机制的探讨. *岩石学报*, 25(7):1529~1560.
- 于胜尧,张建新,侯可军. 2011. 柴北缘都兰 UHP 地体中两期不同性质的岩浆活动:对碰撞造山作用的启示. *岩石学报*, 27(11):3335~3349.
- 俞建章,林英锡. 1961. 从珊瑚化石来讨论祁连山南北坡早石炭世地层对比问题. *地质学报*, 41(2):154~173.
- 袁洪林,吴福元,高山,柳小明,徐平,孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. *科学通报*, 48(14):1511~1520.
- 张璐. 2014. 全吉地块元古代(变)沉积碎屑岩的成因和构造演化. 中国地质大学博士学位论文.
- 赵红格,刘池洋. 2003. 物源分析方法及研究进展. *沉积学报*, 21(3):409~415.

Provenance analysis of the Maoniushan Formation in the North Qaidam basin and its tectonic significance

ZHANG Chunyu^{1,2)}, ZHAO Yue^{* 2)}, LIU Jin³⁾, DAI Kun^{2,4)}, ZHENG Ce²⁾

1) *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing, 100083;*

2) *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081;*

3) *China University of Petroleum, School of Geosciences, Qingdao, Shandong, 266555;*

4) *Research Institute of Exploration and Development, Dagang Oilfield Company, Tianjin, 300280*

** Corresponding author: yue_zhao@cags.ac.cn*

Abstract

The Maoniushan Formation in the northern margin of the Qaidam Basin consists mainly of purple red terrestrial sand and conglomerate, but its depositional age has long been controversial. This study has carried out an investigation for the depositional characteristics, paleocurrent direction and composition of gravels and LA-ICP-MS dating. The results show that the Maoniushan Formation is characterized by alluvial deposit, with the main paleocurrent directions from northwest to southeast and from southeast to northwest. The composition of gravels is quite distinct in two profiles, with the Chengqianggou profile dominated by carbonate and the Wanggaxiu profile being quite complicated. The youngest U-Pb ages of detrital zircons in sandy fillings of conglomerate can be divided into three populations: 360~560 Ma, 890~1050 Ma and 220~2500 Ma. They represent three tectonic events, including ocean-continent subduction to continent-continent collision of the North Qaidam in the Paleozoic, Grenville collisional orogeny in the Neoproterozoic and continent growth in the Late Archean. The youngest U-Pb age of detrital zircon is 365 ± 3 Ma. Combined with regional background and paleontological data, we suggest that the depositional age of the Maoniushan Formation is Late Devonian. The U-Pb ages of the third and forth granitoids are consistent with the youngest U-Pb age of our detrital zircons, indicating the two episodes of granites have undergone rapid exhumation. Combined with previous studies, we suggest that the North Qaidam had evolved into the post-collision stage during the deposition of the Maoniushan Formation.

Key words: North Qaidam; the Maoniushan Formation; provenance analysis; U-Pb dating of zircon

附表 1 柴达木盆地北缘城墙沟剖面样品碎屑锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年数据

Appendix 1 LA-ICP-MS detrital zircons U-Pb dating results of Chengqianggou samples in north Qaidam basin

样品	元素含量				同位素比值						同位素年龄(Ma)					
	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	^{206}Pb ($\times 10^{-6}$)	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ
CQGL0502																
A006	253.34	283.65	0.89	602.51	0.1656	0.0022	10.9412	0.1047	0.4794	0.0032	2513	8	2518	9	2525	14
A007	263.67	186.23	1.42	49.58	0.0579	0.0037	0.5033	0.0316	0.0631	0.0007	525	144	414	21	394	4
A008	57.39	478.19	0.12	348.28	0.0738	0.0011	1.7226	0.0205	0.1694	0.0010	1035	15	1017	8	1009	6
A009	124.25	384.06	0.32	449.39	0.1018	0.0018	3.9437	0.0632	0.2809	0.0020	1658	33	1623	13	1596	10
A011	174.96	822.82	0.21	1066.32	0.1199	0.0012	4.9689	0.0404	0.3007	0.0016	1954	18	1814	7	1695	8
A013	384.55	273.03	1.41	94.05	0.0592	0.0031	0.6576	0.0336	0.0806	0.0008	574	116	513	21	500	5
A014	456.09	314.89	1.45	82.8	0.0561	0.0016	0.4783	0.0131	0.0619	0.0005	456	46	397	9	387	3
A016	108.98	93.23	1.17	25.66	0.0554	0.0031	0.4990	0.0269	0.0654	0.0009	427	97	411	18	408	5
A017	217.59	187.25	1.16	48.48	0.0546	0.0021	0.4653	0.0173	0.0619	0.0006	394	66	388	12	387	4
A018	48.89	103.05	0.47	202.59	0.1625	0.0025	10.5678	0.1328	0.4718	0.0038	2481	11	2486	12	2492	17
A023	139.1	241.73	0.58	169.96	0.0769	0.0022	1.7766	0.0484	0.1675	0.0013	1119	58	1037	18	999	7
A024	316.61	1246.54	0.25	1095.52	0.0874	0.0010	2.5979	0.0260	0.2156	0.0012	1369	22	1300	7	1259	6
A025	176.85	231.23	0.76	535.84	0.1873	0.0022	13.8766	0.1113	0.5373	0.0033	2719	6	2741	8	2772	14
A029	229.79	1552.01	0.15	2820.78	0.1628	0.0013	9.7115	0.0620	0.4326	0.0022	2485	14	2408	6	2317	10
A030	82.88	147.74	0.56	105.38	0.0727	0.0020	1.7502	0.0460	0.1746	0.0017	1006	38	1027	17	1037	9
A031	247.02	322.47	0.77	552.12	0.1528	0.0019	8.6258	0.0790	0.4095	0.0026	2377	8	2299	8	2212	12
A032	117.79	245.58	0.48	184.45	0.0775	0.0016	1.9208	0.0339	0.1797	0.0013	1134	23	1088	12	1065	7
A033	165.47	205.17	0.81	313.01	0.1622	0.0023	7.9880	0.0876	0.3571	0.0025	2479	10	2230	10	1969	12
A034	54.7	54.08	1.01	13.59	0.0548	0.0068	0.4455	0.0548	0.0590	0.0012	403	285	374	39	369	7
A038	37.77	54.23	0.70	13.83	0.0532	0.0049	0.4485	0.0406	0.0612	0.0011	336	171	376	28	383	7
A039	263.47	208.51	1.26	254.02	0.1009	0.0017	4.0918	0.0588	0.2942	0.0022	1640	16	1653	12	1662	11
A040	10.39	21.57	0.48	15.15	0.0784	0.0061	1.8534	0.1402	0.1714	0.0038	1157	116	1065	50	1020	21
A041	326.13	296.04	1.10	78.87	0.0566	0.0018	0.4859	0.0144	0.0622	0.0005	477	51	402	10	389	3
A043	126.99	82.49	1.54	20.83	0.0563	0.0036	0.4619	0.0288	0.0595	0.0009	463	112	386	20	373	5
A045	95.69	148.64	0.64	37.22	0.0574	0.0028	0.4785	0.0224	0.0605	0.0007	505	82	397	15	379	4
A046	20.79	704.55	0.03	443.33	0.0722	0.0011	1.5040	0.0218	0.1510	0.0009	992	33	932	9	907	5
A048	162.51	195.97	0.83	48.66	0.0550	0.0024	0.4535	0.0187	0.0598	0.0006	412	73	380	13	374	4
A050	123.19	103.05	1.20	53.98	0.0657	0.0023	1.1544	0.0393	0.1273	0.0013	797	54	779	19	773	8
A054	92.75	88.28	1.05	23.24	0.0591	0.0018	0.5064	0.0140	0.0622	0.0005	572	46	416	9	389	3
A055	102.78	1482.46	0.07	1004.11	0.0719	0.0006	1.5856	0.0099	0.1600	0.0008	983	16	965	4	957	4
A056	93.34	84.82	1.10	159.65	0.1542	0.0019	9.4651	0.0769	0.4454	0.0026	2393	7	2384	7	2375	12
A058	31.67	39.82	0.80	67.91	0.1379	0.0026	7.5352	0.1292	0.3963	0.0031	2201	33	2177	15	2152	14
A059	419.65	539.25	0.78	647.55	0.0999	0.0011	3.9244	0.0244	0.2851	0.0015	1622	5	1619	5	1617	7
A061	275.09	256.34	1.07	63.08	0.0546	0.0011	0.4410	0.0076	0.0586	0.0004	397	28	371	5	367	2
A062	87.77	44.25	1.98	113.31	0.2444	0.0029	20.5503	0.1672	0.6101	0.0040	3149	6	3118	8	3070	16
A063	115.06	134.75	0.85	33.38	0.0564	0.0020	0.4576	0.0161	0.0589	0.0005	467	82	383	11	369	3
A064	36.75	49.99	0.74	72.36	0.1228	0.0018	5.8507	0.0684	0.3457	0.0024	1997	11	1954	10	1914	11
A065	223.49	305.61	0.73	200.31	0.0715	0.0009	1.5447	0.0142	0.1567	0.0009	972	10	948	6	939	5
A066	392.29	268.68	1.46	67.44	0.0538	0.0010	0.4452	0.0075	0.0601	0.0004	361	27	374	5	376	2
A070	69.54	115.6	0.60	245.18	0.1889	0.0021	13.2859	0.0914	0.5101	0.0029	2733	5	2700	6	2657	12
A071	222.09	268.2	0.83	67.9	0.0539	0.0011	0.4534	0.0078	0.0610	0.0004	369	27	380	5	381	2
A072	265.97	620.14	0.43	315.77	0.0666	0.0009	1.1247	0.0132	0.1225	0.0007	825	28	765	6	745	4
A073	95.81	77.03	1.24	19.48	0.0588	0.0019	0.4949	0.0149	0.0610	0.0005	560	51	408	10	382	3
A075	69.79	556.71	0.13	651.84	0.1063	0.0012	4.1526	0.0257	0.2833	0.0015	1737	5	1665	5	1608	7
A078	46.42	167.39	0.28	229.71	0.1290	0.0017	5.7069	0.0680	0.3209	0.0019	2084	24	1932	10	1794	9
A079	280.99	237.6	1.18	59.46	0.0558	0.0011	0.4677	0.0079	0.0608	0.0004	443	26	390	5	381	2
A080	177.02	228.73	0.77	259.43	0.1012	0.0012	3.8528	0.0296	0.2760	0.0015	1647	7	1604	6	1571	8
A081	239.25	286.01	0.84	506.13	0.1506	0.0016	8.9547	0.0563	0.4311	0.0023	2353	5	2333	6	2311	10
A086	176.72	225.07	0.79	205.33	0.0852	0.0014	2.6131	0.0386	0.2226	0.0013	1319	32	1304	11	1295	7
A090	664.38	554.36	1.20	137.22	0.0541	0.0008	0.4549	0.0054	0.0610	0.0003	376	17	381	4	381	2
A091	109.06	75.69	1.44	18.48	0.0531	0.0020	0.4410	0.0159	0.0602	0.0005	334	66	371	11	377	3
A093	116.08	157.51	0.74	293.41	0.1626	0.0018	10.3246	0.0713	0.4603	0.0026	2483	5	2464	6	2441	11
A094	833.59	1442.45	0.58	492.2	0.0604	0.0009	0.6973	0.0097	0.0837	0.0005	619	33	537	6	518	3
A096	130.75	206.98	0.63	379.19	0.1587	0.0018	9.9410	0.0660	0.4543	0.0025	2441	5	2429	6	2414	11
A098	552.46	518.76	1.06	130.31	0.0553	0.0008	0.4766	0.0058	0.0624	0.0004	426	17	396	4	390	2
A102	132.76	322.96	0.41	257.28	0.0789	0.0014	2.1150	0.0351	0.1944	0.0012	1170	36	1154	11	1145	7
A104	140.03	174.52	0.80	40.64	0.0566	0.0014	0.4548	0.0101	0.0583	0.0004	474	36	381	7	365	3
A105	109.91	388.18	0.28	1043.5	0.2765	0.0029	25.6955	0.1449	0.6738	0.0036	3343	4	3335	6	3321	14

续表 1

样品	元素含量				同位素比值						同位素年龄(Ma)					
	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	²⁰⁶ Pb ($\times 10^{-6}$)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ
CQGL0503																
A106	203.15	598.92	0.34	709.25	0.1054	0.0011	4.2785	0.0363	0.2944	0.0016	1721	19	1689	7	1663	8
A107	279.7	182.26	1.53	74.09	0.0598	0.0011	0.8418	0.0128	0.1021	0.0006	595	22	620	7	627	4
A109	1056.9	1089.65	0.97	688.72	0.0773	0.0013	1.6856	0.0256	0.1582	0.0009	1128	33	1003	10	947	5
A110	94.19	178.88	0.53	110.58	0.0702	0.0013	1.4959	0.0263	0.1545	0.0010	935	39	929	11	926	5
A111	30.97	824.26	0.04	509.56	0.0742	0.0008	1.5964	0.0114	0.1561	0.0008	1046	7	969	4	935	5
A112	129.14	465.95	0.28	298.3	0.0721	0.0009	1.6101	0.0133	0.1618	0.0009	990	9	974	5	967	5
A113	129.74	88.63	1.46	21.53	0.0553	0.0019	0.4688	0.0151	0.0615	0.0005	424	57	390	10	384	3
A114	116.95	119.72	0.98	28.02	0.0584	0.0016	0.4773	0.0124	0.0593	0.0005	543	43	396	9	371	3
A118	226.7	224.22	1.01	182.78	0.0777	0.0010	2.1348	0.0193	0.1993	0.0011	1138	9	1160	6	1172	6
A119	162.56	210.33	0.77	398.3	0.1580	0.0017	10.0788	0.0622	0.4628	0.0025	2434	5	2442	6	2452	11
A120	340.24	364.78	0.93	310.64	0.0775	0.0009	2.2232	0.0162	0.2080	0.0011	1135	7	1188	5	1218	6
A121	87.39	74.58	1.17	143.61	0.1618	0.0019	10.4877	0.0797	0.4701	0.0028	2474	6	2479	7	2484	12
A122	276.13	320.43	0.86	119.15	0.0579	0.0008	0.7237	0.0079	0.0907	0.0005	524	14	553	5	560	3
A123	299.49	555.44	0.54	222.32	0.0595	0.0007	0.8011	0.0068	0.0976	0.0005	586	10	597	4	600	3
A125	37.71	245.01	0.15	155.71	0.0693	0.0009	1.4801	0.0146	0.1548	0.0009	909	11	922	6	928	5
A126	142.84	152.68	0.94	82.38	0.0654	0.0010	1.1839	0.0141	0.1314	0.0008	786	15	793	7	796	4
A127	221.31	255.88	0.86	185.16	0.0728	0.0009	1.7673	0.0154	0.1761	0.0010	1008	9	1034	6	1046	5
A129	235.51	192.22	1.23	227.97	0.0975	0.0011	3.8752	0.0294	0.2883	0.0016	1576	7	1609	6	1633	8
A130	58.67	102.14	0.57	259.55	0.2600	0.0030	21.9424	0.2047	0.6121	0.0043	3247	19	3181	9	3078	17
A134	33.56	27.19	1.23	16.29	0.0727	0.0038	1.4461	0.0734	0.1442	0.0016	1007	108	908	30	868	9
A135	156.2	126.7	1.23	151.94	0.0987	0.0012	3.9563	0.0348	0.2906	0.0017	1600	8	1625	7	1645	8
A136	137.69	86.39	1.59	133.09	0.1432	0.0029	7.3203	0.1374	0.3708	0.0029	2266	36	2151	17	2033	14
A137	106.27	101.83	1.04	86.7	0.0817	0.0012	2.3214	0.0284	0.2061	0.0013	1238	14	1219	9	1208	7
A138	425.23	163.49	2.60	139.05	0.0823	0.0011	2.3346	0.0233	0.2058	0.0012	1252	11	1223	7	1206	6
A139	25.59	23.49	1.09	17.47	0.0826	0.0024	2.0482	0.0553	0.1799	0.0018	1259	37	1132	18	1066	10
A141	184.04	70.11	2.63	25.39	0.0606	0.0016	0.7315	0.0175	0.0875	0.0007	626	39	557	10	541	4
A142	184.4	166.12	1.11	95.36	0.0704	0.0011	1.3450	0.0171	0.1386	0.0009	939	16	865	7	837	5
A143	102.59	167.73	0.61	185.02	0.0958	0.0012	3.5173	0.0309	0.2662	0.0015	1544	8	1531	7	1521	8
A144	114.84	91.43	1.26	108.47	0.1008	0.0014	3.9780	0.0413	0.2861	0.0018	1639	10	1630	8	1622	9
A145	141.14	133.82	1.05	103.21	0.0759	0.0011	1.9460	0.0227	0.1859	0.0011	1093	14	1097	8	1099	6
A146	121.74	317.48	0.38	209.5	0.0707	0.0009	1.5500	0.0141	0.1590	0.0009	949	10	950	6	951	5
A150	137.94	175.86	0.78	114.24	0.0768	0.0018	1.6452	0.0368	0.1554	0.0011	1116	48	988	14	931	6
A151	31.36	321.51	0.10	254.79	0.0876	0.0011	2.2772	0.0240	0.1886	0.0011	1373	24	1205	7	1114	6
A152	143.14	785.62	0.18	353.38	0.0601	0.0007	0.8955	0.0070	0.1080	0.0006	608	8	649	4	661	3
A154	153.19	266.53	0.57	285.33	0.0903	0.0011	3.1994	0.0238	0.2569	0.0014	1433	7	1457	6	1474	7
A155	191.22	342.04	0.56	120.66	0.0587	0.0009	0.6847	0.0088	0.0846	0.0005	556	18	530	5	524	3
A157	149.73	239.65	0.62	155.28	0.0713	0.0013	1.5126	0.0258	0.1539	0.0009	965	38	935	10	923	5
A158	114.61	122.85	0.93	77.78	0.0710	0.0011	1.4834	0.0192	0.1516	0.0009	957	16	924	8	910	5
A159	426.27	602.78	0.71	225.75	0.0589	0.0008	0.7274	0.0069	0.0896	0.0005	562	12	555	4	553	3
A160	120.52	221.06	0.55	388.05	0.1625	0.0018	9.4077	0.0648	0.4199	0.0024	2482	5	2379	6	2260	11
A161	85.73	406.33	0.21	283.41	0.0721	0.0009	1.6568	0.0139	0.1668	0.0009	988	9	992	5	994	5
A162	87.82	624.65	0.14	1579.52	0.2321	0.0024	19.3347	0.1074	0.6042	0.0031	3067	4	3059	5	3047	13
A166	53.53	127.86	0.42	85.44	0.0725	0.0012	1.5919	0.0212	0.1593	0.0010	999	17	967	8	953	6
A168	76.74	269.7	0.28	175.24	0.0701	0.0009	1.4921	0.0173	0.1544	0.0009	931	27	927	7	925	5
A169	156.86	304.67	0.51	211.05	0.0727	0.0009	1.6522	0.0153	0.1649	0.0009	1004	10	990	6	984	5
A170	85.79	190.41	0.45	198.37	0.0935	0.0012	3.1968	0.0269	0.2479	0.0014	1499	8	1456	7	1428	7
A171	150.83	279.74	0.54	197.35	0.0710	0.0009	1.6425	0.0145	0.1678	0.0009	957	10	987	6	1000	5
A173	206.11	460.18	0.45	325.17	0.0741	0.0009	1.7120	0.0193	0.1676	0.0009	1043	26	1013	7	999	5
A174	101.81	100.91	1.01	65.66	0.0704	0.0012	1.4997	0.0214	0.1545	0.0010	940	19	930	9	926	6
A175	205.89	439.73	0.47	384.08	0.0815	0.0011	2.3224	0.0293	0.2066	0.0012	1234	28	1219	9	1211	6
A176	356.39	91.89	3.88	179.76	0.1616	0.0019	10.3407	0.0830	0.4641	0.0028	2473	6	2466	7	2457	12
A177	302.11	594.89	0.51	507.18	0.0839	0.0011	2.2978	0.0274	0.1986	0.0011	1290	26	1212	8	1168	6
A178	94.56	175.43	0.54	77.41	0.0695	0.0011	1.0014	0.0128	0.1046	0.0006	912	16	705	6	641	4
A182	185.36	200.44	0.92	151.06	0.0774	0.0011	1.9825	0.0228	0.1858	0.0012	1132	13	1110	8	1099	6
A183	245.77	864.95	0.28	556.62	0.0734	0.0010	1.5905	0.0195	0.1573	0.0009	1024	28	966	8	942	5
A184	223.09	266.17	0.84	510.5	0.1631	0.0018	10.6162	0.0680	0.4722	0.0026	2488	5	2490	6	2493	11
A185	82.33	730.63	0.11	509.44	0.0727	0.0007	1.7161	0.0138	0.1712	0.0009	1006	20	1015	5	1019	5
A186	185.02	206.77	0.89	144.72	0.0734	0.0010	1.7407	0.0181	0.1720	0.0010	1025	12	1024	7	1023	6

续表 1

样品	元素含量				同位素比值						同位素年龄(Ma)					
	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	²⁰⁶ Pb ($\times 10^{-6}$)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ
A187	49.5	117.78	0.42	77.05	0.0708	0.0013	1.5649	0.0273	0.1603	0.0011	951	39	956	11	959	6
A189	101.71	682.97	0.15	466.24	0.0735	0.0007	1.6916	0.0144	0.1670	0.0009	1026	21	1005	5	996	5
A190	51.22	145	0.35	91.82	0.0706	0.0012	1.5069	0.0239	0.1547	0.0010	947	36	933	10	927	5
A191	90.81	178.83	0.51	368.5	0.1777	0.0020	12.3525	0.0831	0.5043	0.0029	2631	5	2632	6	2632	12
A192	29.08	374.6	0.08	217.27	0.0668	0.0009	1.3068	0.0121	0.1418	0.0008	832	10	849	5	855	4
A193	8.56	73.6	0.12	50.49	0.0691	0.0014	1.5972	0.0289	0.1676	0.0012	902	25	969	11	999	7
A194	81.68	166.49	0.49	105.53	0.0708	0.0014	1.5063	0.0273	0.1543	0.0010	952	40	933	11	925	6
A198	137.79	200.76	0.69	533.82	0.2433	0.0026	21.7043	0.1321	0.6470	0.0035	3141	4	3171	6	3216	14
A199	126.97	222.88	0.57	156.08	0.0748	0.0012	1.7564	0.0215	0.1703	0.0011	1063	15	1030	8	1013	6
A200	103.24	63.86	1.62	52.31	0.0815	0.0015	2.2369	0.0343	0.1990	0.0014	1234	19	1193	11	1170	8
A201	107.82	260.22	0.41	532.44	0.1777	0.0016	12.1497	0.0888	0.4958	0.0028	2632	16	2616	7	2596	12
A202	27.07	328.18	0.08	225.53	0.0716	0.0009	1.6454	0.0148	0.1667	0.0009	974	10	988	6	994	5
A203	180.6	125.35	1.44	93.89	0.0784	0.0012	1.9615	0.0237	0.1815	0.0011	1156	14	1102	8	1075	6
A205	222.81	720.3	0.31	486.36	0.0732	0.0009	1.6424	0.0172	0.1628	0.0009	1019	24	987	7	972	5
A206	93.72	163.72	0.57	458.27	0.2763	0.0030	25.7856	0.1593	0.6766	0.0038	3342	4	3338	6	3331	14
A207	218.16	294.28	0.74	408.07	0.1396	0.0016	6.4486	0.0466	0.3349	0.0019	2222	6	2039	6	1862	9
A208	135.67	182.29	0.74	221.79	0.1023	0.0013	4.1430	0.0351	0.2936	0.0017	1666	8	1663	7	1659	8
A210	125.02	296.77	0.42	192.67	0.0711	0.0009	1.5357	0.0146	0.1565	0.0009	961	11	945	6	937	5
A214	194.46	286.99	0.68	100.77	0.0581	0.0010	0.6761	0.0091	0.0844	0.0005	533	19	524	5	522	3
A215	231.13	233.42	0.99	145.36	0.0691	0.0018	1.4152	0.0364	0.1485	0.0011	903	56	895	15	892	6
A216	165.16	255.99	0.65	217.21	0.0831	0.0012	2.3271	0.0311	0.2031	0.0012	1271	29	1221	9	1192	6
A217	107.69	195.74	0.55	432.22	0.1900	0.0021	13.8781	0.0892	0.5294	0.0029	2743	5	2741	6	2739	12
A218	110.86	138.87	0.80	102.22	0.0732	0.0012	1.7797	0.0241	0.1763	0.0011	1019	17	1038	9	1047	6
A219	268.7	473.52	0.57	898.87	0.1630	0.0016	10.1806	0.0830	0.4530	0.0026	2487	17	2451	8	2408	11
A221	106.53	126.99	0.84	227.13	0.1638	0.0021	9.6273	0.1083	0.4263	0.0028	2495	22	2400	10	2289	13
A222	325.71	250.4	1.30	323.03	0.1083	0.0019	4.5634	0.0759	0.3057	0.0020	1770	33	1743	14	1720	10
A223	43.11	64.2	0.67	140.8	0.1989	0.0025	14.3548	0.1294	0.5232	0.0035	2817	7	2773	9	2713	15
A224	101.88	87.68	1.16	65.45	0.0810	0.0014	1.9888	0.0292	0.1779	0.0012	1222	18	1112	10	1056	7
A225	95.01	130.71	0.73	194.48	0.1237	0.0015	6.0472	0.0501	0.3544	0.0021	2010	7	1983	7	1955	10
A226	90.63	215.84	0.42	302.5	0.1214	0.0015	5.5373	0.0593	0.3309	0.0020	1977	22	1906	9	1843	10
CQGL0701																
A454	481.26	529.04	0.91	161.04	0.0595	0.0014	0.6075	0.0126	0.0740	0.0005	587	32	482	8	460	3
A455	286.66	352.21	0.81	103.22	0.0606	0.0016	0.5945	0.0148	0.0712	0.0006	624	40	474	9	443	3
A456	183.61	185.22	0.99	47.38	0.0594	0.0024	0.5090	0.0193	0.0621	0.0007	583	64	418	13	388	4
A457	140.27	374.79	0.37	124.52	0.0575	0.0015	0.6392	0.0157	0.0806	0.0006	511	40	502	10	500	4
A458	169.73	314.05	0.54	91.77	0.0569	0.0017	0.5562	0.0154	0.0708	0.0006	489	46	449	10	441	4
A461	95.18	293.28	0.32	198.39	0.0748	0.0015	1.6865	0.0296	0.1636	0.0012	1062	24	1003	11	977	7
A463	253.93	281.43	0.90	71.12	0.0544	0.0020	0.4579	0.0158	0.0610	0.0006	388	60	383	11	382	4
A464	211.39	736.51	0.29	459.85	0.0731	0.0015	1.5190	0.0269	0.1507	0.0011	1017	24	938	11	905	6
A465	177.29	159.01	1.11	41.55	0.0540	0.0025	0.4695	0.0213	0.0630	0.0007	372	81	391	15	394	4
A466	93.18	71.4	1.31	18.05	0.0562	0.0045	0.4723	0.0371	0.0609	0.0011	461	144	393	26	381	6
A470	58.28	203.64	0.29	119.99	0.0697	0.0032	1.3481	0.0603	0.1402	0.0018	921	98	867	26	846	10
A471	248.63	436.37	0.57	111.31	0.0587	0.0017	0.4957	0.0132	0.0613	0.0005	556	44	409	9	383	3
A472	83.36	61.46	1.36	15.64	0.0568	0.0046	0.4782	0.0380	0.0611	0.0012	483	143	397	26	382	7
A473	401.34	340.37	1.18	95.82	0.0601	0.0019	0.5598	0.0165	0.0675	0.0006	609	48	451	11	421	4
A474	174.76	420.73	0.42	130.32	0.0575	0.0016	0.5886	0.0148	0.0742	0.0006	511	41	470	9	462	4
A475	303.81	191.28	1.59	105.24	0.0647	0.0018	1.1753	0.0305	0.1318	0.0012	765	40	789	14	798	7
A477	142.85	313.27	0.46	396.66	0.1049	0.0016	4.3788	0.0557	0.3029	0.0021	1712	14	1708	11	1705	10
A478	94.8	77.87	1.22	20.88	0.0587	0.0040	0.5182	0.0342	0.0641	0.0011	555	114	424	23	400	7
A479	136.98	297.47	0.46	96.21	0.0562	0.0026	0.5884	0.0269	0.0759	0.0008	460	107	470	17	472	5
A480	239.24	349.51	0.68	100.31	0.0584	0.0017	0.5515	0.0152	0.0685	0.0006	545	45	446	10	427	3
A482	136.53	169.42	0.81	47.57	0.0532	0.0025	0.4909	0.0227	0.0669	0.0008	338	84	406	15	418	5

附表 2 柴达木盆地北缘旺尕秀剖面样品碎屑锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年数据

Appendix 2 LA-ICP-MS detrital zircons U-Pb dating results of Wanggaxiu samples in north Qaidam basin

样品	元素含量				同位素比值						年龄(Ma)					
	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	^{206}Pb ($\times 10^{-6}$)	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ
WGXL0902																
A230	73.38	105.27	0.70	199.79	0.1526	0.0018	9.5659	0.0803	0.4545	0.0028	2375	7	2394	8	2415	12
A231	46.05	188.31	0.24	339.41	0.1507	0.0017	8.9755	0.0620	0.4318	0.0024	2354	5	2336	6	2314	11
A232	149.12	154.18	0.97	245.12	0.1323	0.0015	6.9507	0.0494	0.3810	0.0021	2129	6	2105	6	2081	10
A233	74.4	255.22	0.29	440.57	0.1458	0.0016	8.3213	0.0529	0.4138	0.0022	2297	5	2267	6	2232	10
A234	142.7	310.75	0.46	547.63	0.1501	0.0016	8.7457	0.0561	0.4226	0.0023	2347	5	2312	6	2272	10
A235	38.94	97.19	0.40	179.13	0.1501	0.0018	9.1507	0.0782	0.4421	0.0028	2347	7	2353	8	2360	12
A237	129.2	207.15	0.62	384.69	0.1527	0.0017	9.3886	0.0597	0.4458	0.0024	2377	5	2377	6	2376	11
A238	52.61	94.67	0.56	162.42	0.1434	0.0017	8.1076	0.0814	0.4101	0.0025	2269	21	2243	9	2215	11
A239	155.23	222.64	0.70	406.65	0.1540	0.0017	9.3189	0.0605	0.4387	0.0024	2391	5	2370	6	2345	11
A240	101.32	134.58	0.75	248.89	0.1526	0.0018	9.3488	0.0710	0.4444	0.0026	2375	6	2373	7	2370	12
A241	192.9	347.92	0.55	501.78	0.1170	0.0013	5.5946	0.0358	0.3466	0.0019	1912	5	1915	6	1919	9
A242	30.77	363.75	0.08	692.86	0.1555	0.0017	9.8220	0.0578	0.4580	0.0024	2408	4	2418	5	2431	11
A246	88.18	317.18	0.28	573.11	0.1486	0.0016	8.9141	0.0586	0.4350	0.0024	2330	5	2329	6	2328	11
A249	55.77	136.17	0.41	245.89	0.1486	0.0017	8.9144	0.0642	0.4352	0.0025	2330	6	2329	7	2329	11
A250	57.54	223.79	0.26	423.81	0.1556	0.0017	9.7930	0.0642	0.4565	0.0025	2408	5	2415	6	2424	11
A253	91.9	201.18	0.46	331.27	0.1488	0.0016	8.1252	0.0720	0.3962	0.0023	2332	19	2245	8	2151	11
A254	62.51	348.06	0.18	507.73	0.1190	0.0013	5.7786	0.0374	0.3521	0.0019	1942	5	1943	6	1945	9
A255	109.68	244.05	0.45	445.51	0.1515	0.0017	9.2052	0.0589	0.4408	0.0024	2363	5	2359	6	2354	11
A258	54.44	146.12	0.37	267.56	0.1543	0.0019	9.4173	0.0789	0.4426	0.0027	2394	7	2380	8	2362	12
A262	63.22	110.15	0.57	202.59	0.1490	0.0018	9.1435	0.0701	0.4452	0.0026	2334	6	2352	7	2374	12
A263	37.3	106.86	0.35	202.7	0.1556	0.0018	9.8550	0.0754	0.4593	0.0027	2409	6	2421	7	2436	12
A264	112.17	169.99	0.66	299.23	0.1505	0.0017	8.8457	0.0644	0.4264	0.0024	2352	6	2322	7	2289	11
A265	33.95	128.92	0.26	225.42	0.1469	0.0018	8.5816	0.0708	0.4237	0.0026	2311	7	2295	7	2277	12
A267	37.31	70.44	0.53	138.31	0.1674	0.0020	10.9828	0.0909	0.4761	0.0030	2531	7	2522	8	2510	13
A270	122.12	273.7	0.45	402.7	0.1193	0.0014	5.8710	0.0406	0.3571	0.0020	1945	6	1957	6	1968	9
A272	72.01	174.8	0.41	325.68	0.1564	0.0018	9.7553	0.0677	0.4525	0.0026	2417	5	2412	6	2406	11
A273	130.8	245.89	0.53	455.05	0.1598	0.0018	9.9045	0.0684	0.4496	0.0025	2454	5	2426	6	2393	11
A274	72.55	206.58	0.35	373.72	0.1553	0.0018	9.4122	0.0670	0.4397	0.0025	2405	6	2379	7	2349	11
A278	101.24	289.56	0.35	499.42	0.1462	0.0015	8.3135	0.0705	0.4125	0.0023	2302	18	2266	8	2226	11
A280	90.44	169.64	0.53	310.73	0.1544	0.0018	9.4932	0.0667	0.4461	0.0025	2395	5	2387	6	2378	11
A281	94.23	202.53	0.47	375.68	0.1568	0.0018	9.7648	0.0667	0.4519	0.0025	2421	5	2413	6	2403	11
A282	161.19	129.2	1.25	207.45	0.1319	0.0016	7.1130	0.0563	0.3913	0.0023	2123	7	2126	7	2129	11
A283	84.84	351.78	0.24	535.1	0.1405	0.0013	7.1784	0.0511	0.3705	0.0020	2234	16	2134	6	2032	9
A285	86.79	209.73	0.41	355.92	0.1497	0.0018	8.5416	0.0654	0.4140	0.0024	2342	6	2290	7	2233	11
A286	20.99	185.74	0.11	341.95	0.1558	0.0018	9.6488	0.0685	0.4492	0.0026	2411	6	2402	7	2392	11
A287	123.58	257.56	0.48	477.85	0.1592	0.0018	9.9362	0.0679	0.4529	0.0025	2447	5	2429	6	2408	11
A288	95.02	186.49	0.51	271.18	0.1215	0.0014	5.9471	0.0456	0.3551	0.0020	1978	6	1968	7	1959	10
A289	2.621	86.72	0.03	128.17	0.1246	0.0016	6.2003	0.0588	0.3610	0.0023	2023	9	2004	8	1987	11
A290	106.69	301.11	0.35	496.38	0.1504	0.0017	8.3506	0.0594	0.4028	0.0023	2350	6	2270	6	2182	10
A294	141.1	289.62	0.49	507.95	0.1549	0.0017	9.1589	0.0585	0.4289	0.0024	2401	5	2354	6	2301	11
A295	71.85	185.64	0.39	361.72	0.1643	0.0019	10.7812	0.0786	0.4761	0.0028	2500	6	2504	7	2510	12
A296	80.49	78.63	1.02	151.61	0.1551	0.0019	10.0639	0.0823	0.4707	0.0029	2403	7	2441	8	2487	13
A297	88.82	83.79	1.06	111.21	0.1144	0.0022	5.0264	0.0901	0.3186	0.0023	1871	36	1824	15	1783	11
A298	117.63	226.22	0.52	404.32	0.1512	0.0017	9.0786	0.0616	0.4356	0.0025	2359	5	2346	6	2331	11
A299	60.71	289.19	0.21	407.23	0.1194	0.0011	5.6195	0.0422	0.3415	0.0019	1946	17	1919	6	1894	9
A301	52.1	203.21	0.26	297.61	0.1240	0.0013	6.0718	0.0537	0.3551	0.0021	2015	19	1986	8	1959	10
A302	199.06	189.81	1.05	331.77	0.1481	0.0017	8.6649	0.0599	0.4245	0.0024	2324	5	2303	6	2281	11
A303	145.9	276.17	0.53	404.1	0.1174	0.0013	5.7450	0.0388	0.3551	0.0020	1916	6	1938	6	1959	9
A304	44.65	214.01	0.21	372.21	0.1476	0.0014	8.5724	0.0662	0.4213	0.0024	2318	17	2294	7	2266	11
A305	111.41	214.05	0.52	390.92	0.1536	0.0017	9.3678	0.0630	0.4424	0.0025	2386	5	2375	6	2361	11
A306	115.36	216.69	0.53	385.4	0.1455	0.0016	8.6335	0.0581	0.4305	0.0024	2293	5	2300	6	2308	11

续表 2

样品	元素含量				同位素比值						年龄(Ma)					
	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	^{206}Pb ($\times 10^{-6}$)	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ
A310	81.97	96.52	0.85	178.18	0.1494	0.0018	9.1737	0.0749	0.4453	0.0027	2339	7	2355	7	2374	12
A311	84.25	261.15	0.32	481.57	0.1524	0.0017	9.3365	0.0635	0.4444	0.0025	2373	5	2372	6	2370	11
A312	58.09	110.96	0.52	211.53	0.1532	0.0018	9.6935	0.0717	0.4590	0.0027	2381	6	2406	7	2435	12
A313	91.18	140.04	0.65	250.3	0.1454	0.0019	8.5715	0.0954	0.4275	0.0028	2293	23	2294	10	2295	12
A317	139.89	156.9	0.89	253.48	0.1308	0.0015	6.9853	0.0513	0.3874	0.0022	2108	6	2110	7	2111	10
A318	82.95	388.3	0.21	488.22	0.1107	0.0010	4.5797	0.0342	0.3000	0.0016	1811	17	1746	6	1691	8
A319	20.81	125.35	0.17	184.6	0.1170	0.0014	5.6850	0.0475	0.3525	0.0021	1910	7	1929	7	1947	10
A320	147.5	436.62	0.34	511.09	0.1260	0.0012	4.8234	0.0386	0.2777	0.0015	2043	18	1789	7	1580	8
A321	72.86	156.5	0.47	286.92	0.1519	0.0017	9.1747	0.0653	0.4381	0.0025	2367	6	2356	7	2342	11
A322	324.99	184.68	1.76	275.47	0.1194	0.0014	5.8627	0.0426	0.3562	0.0020	1947	6	1956	6	1964	10
A326	94.13	268.17	0.35	465.13	0.1455	0.0016	8.2648	0.0755	0.4121	0.0025	2293	19	2260	8	2225	11
A329	65.55	160.4	0.41	297.11	0.1547	0.0017	9.3795	0.0649	0.4397	0.0025	2398	5	2376	6	2349	11
A333	41.33	187.3	0.22	300.93	0.1303	0.0013	6.8017	0.0529	0.3785	0.0021	2102	17	2086	7	2069	10
A334	102.79	245.3	0.42	462.39	0.1532	0.0017	9.4106	0.0598	0.4455	0.0024	2381	5	2379	6	2375	11
A335	18.96	187.29	0.10	231.89	0.1140	0.0012	4.5768	0.0421	0.2912	0.0017	1864	20	1745	8	1647	9
A337	105.84	316.56	0.33	503.28	0.1375	0.0015	7.1062	0.0452	0.3748	0.0020	2195	5	2125	6	2052	9
WGXL1001																
A342	195.52	264.54	0.74	483.85	0.1500	0.0017	9.0870	0.0855	0.4395	0.0026	2345	19	2347	9	2348	12
A343	82.83	125.42	0.66	229.61	0.1512	0.0018	9.2379	0.0694	0.4431	0.0026	2360	6	2362	7	2364	12
A344	52.07	94.65	0.55	174.2	0.1587	0.0019	9.7432	0.0746	0.4452	0.0027	2442	6	2411	7	2374	12
A345	99.56	180.18	0.55	311.9	0.1470	0.0016	8.4836	0.0564	0.4184	0.0023	2312	5	2284	6	2253	11
A346	114.88	201.05	0.57	370.41	0.1542	0.0017	9.3815	0.0857	0.4412	0.0026	2393	19	2376	8	2356	12
A347	116.15	273.33	0.42	465.13	0.1499	0.0016	8.4925	0.0542	0.4109	0.0023	2345	5	2285	6	2219	10
A349	53.19	192.43	0.28	333.84	0.1455	0.0013	8.3811	0.0618	0.4179	0.0023	2293	16	2273	7	2251	11
A350	83.22	227.07	0.37	416.85	0.1502	0.0016	9.1649	0.0589	0.4425	0.0024	2348	5	2355	6	2362	11
A351	124.49	390.86	0.32	613.61	0.1484	0.0013	7.6800	0.0553	0.3755	0.0021	2327	16	2194	6	2055	10
A352	83.52	198.44	0.42	365.78	0.1526	0.0017	9.3368	0.0645	0.4439	0.0025	2375	5	2372	6	2368	11
A354	112.27	310.91	0.36	455.98	0.1235	0.0013	5.9574	0.0517	0.3499	0.0020	2007	19	1970	8	1934	9
A358	101.05	200.55	0.50	356.46	0.1560	0.0016	9.1436	0.0773	0.4252	0.0025	2412	18	2352	8	2284	11
A359	106.97	137.37	0.78	256.61	0.1551	0.0019	9.4831	0.1000	0.4435	0.0028	2403	21	2386	10	2366	12
A360	75.95	203.77	0.37	353.29	0.1470	0.0017	8.4235	0.0606	0.4156	0.0024	2311	6	2278	7	2241	11
A361	94.55	279	0.34	528.75	0.1507	0.0016	9.4373	0.0595	0.4541	0.0025	2354	5	2381	6	2413	11
A362	65.79	173.76	0.38	328.04	0.1548	0.0017	9.6520	0.0650	0.4521	0.0025	2400	5	2402	6	2405	11
A365	86.13	108.21	0.80	188.54	0.1494	0.0018	8.5772	0.0664	0.4165	0.0025	2338	6	2294	7	2245	11
A366	62.06	118.06	0.53	186.87	0.1404	0.0017	7.3234	0.0562	0.3782	0.0022	2233	6	2152	7	2068	10
A367	121.62	373.12	0.33	548.33	0.1249	0.0014	6.0442	0.0385	0.3509	0.0019	2028	5	1982	6	1939	9
A368	100.65	175.31	0.57	340.25	0.1539	0.0017	9.8299	0.0659	0.4632	0.0026	2390	5	2419	6	2454	11
A369	21.57	412.88	0.05	745.83	0.1551	0.0017	9.2121	0.0559	0.4309	0.0023	2402	5	2359	6	2310	10
A370	38.57	98.77	0.39	182.87	0.1499	0.0018	9.1223	0.0725	0.4414	0.0026	2345	6	2350	7	2357	12
A374	70.9	68.45	1.04	105.43	0.1145	0.0018	5.7849	0.0719	0.3664	0.0026	1872	12	1944	11	2012	12
A375	58.3	140.77	0.41	227.68	0.1400	0.0016	7.4233	0.0548	0.3845	0.0022	2227	6	2164	7	2097	10
A376	91.45	281.47	0.32	419.14	0.1256	0.0014	6.1262	0.0416	0.3538	0.0019	2037	5	1994	6	1953	9
A377	51.02	129	0.40	221.15	0.1444	0.0017	8.1051	0.0608	0.4071	0.0024	2280	6	2243	7	2202	11
A378	1112.59	3144.16	0.35	934.44	0.0569	0.0007	0.5514	0.0059	0.0702	0.0004	489	27	446	4	438	2
A379	89.85	261.6	0.34	480.39	0.1517	0.0017	9.1118	0.0589	0.4356	0.0024	2365	5	2349	6	2331	11
A381	43.13	82.67	0.52	158.59	0.1527	0.0018	9.5712	0.0782	0.4546	0.0028	2376	7	2394	8	2415	12
A382	35.84	67.22	0.53	101.47	0.1222	0.0018	6.0108	0.0774	0.3568	0.0024	1989	26	1977	11	1967	11
A384	31	67.04	0.46	124.73	0.1526	0.0019	9.2579	0.0838	0.4401	0.0028	2375	8	2364	8	2351	13
A385	38.38	72.2	0.53	134.95	0.1569	0.0019	9.5578	0.0833	0.4419	0.0028	2422	7	2393	8	2359	12
A386	67.2	53.04	1.27	90.96	0.1382	0.0029	7.5564	0.1442	0.3965	0.0031	2205	37	2180	17	2153	14
A390	122.71	157.2	0.78	220.34	0.1253	0.0017	5.6387	0.0689	0.3265	0.0020	2033	25	1922	11	1821	10
A391	98.09	297.96	0.33	521.37	0.1508	0.0017	8.5707	0.0594	0.4123	0.0023	2354	5	2293	6	2226	11
A392	196.18	282.74	0.69	388.11	0.1318	0.0015	5.8348	0.0586	0.3212	0.0019	2122	21	1952	9	1795	9
A393	213.04	344.43	0.62	641.41	0.1573	0.0017	9.5061	0.0591	0.4384	0.0024	2427	5	2388	6	2343	11
A395	26.68	73.67	0.36	136.42	0.1505	0.0019	9.0336	0.0786	0.4354	0.0027	2351	7	2341	8	2330	12
A397	146.8	127.8	1.15	235.99	0.1504	0.0026	8.8957	0.1392	0.4290	0.0032	2350	30	2327	14	2301	14
A398	61.91	186.16	0.33	319.88	0.1443	0.0014	8.0140	0.0652	0.4029	0.0023	2279	17	2233	7	2182	11

续表 2

样品	元素含量				同位素比值						年龄(Ma)					
	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	²⁰⁶ Pb ($\times 10^{-6}$)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ
A399	95.06	204.6	0.46	351.78	0.1471	0.0017	8.1814	0.0567	0.4034	0.0022	2312	5	2251	6	2185	10
A401	82.48	143.15	0.58	265.71	0.1536	0.0018	9.2097	0.0687	0.4350	0.0025	2386	6	2359	7	2328	11
A406	93.82	263.94	0.36	414.73	0.1426	0.0016	7.4458	0.0499	0.3788	0.0021	2259	5	2166	6	2071	10
A407	92.23	252.13	0.37	466.1	0.1514	0.0016	9.3058	0.0591	0.4459	0.0024	2362	5	2369	6	2377	11
A408	97.73	291.6	0.34	511.25	0.1464	0.0016	8.5368	0.0538	0.4231	0.0023	2304	5	2290	6	2275	10
A410	126.43	188.81	0.67	359.64	0.1549	0.0017	9.8229	0.0656	0.4601	0.0026	2400	5	2418	6	2440	11
A411	104.42	265.25	0.39	434.34	0.1435	0.0016	7.8265	0.0508	0.3958	0.0022	2269	5	2211	6	2150	10
A413	312.25	426.07	0.73	1040.6	0.2270	0.0024	18.4909	0.1077	0.5909	0.0032	3031	4	3016	6	2993	13
A414	70.44	187.47	0.38	340.73	0.1513	0.0017	9.1768	0.0626	0.4400	0.0025	2361	5	2356	6	2350	11
A415	47.67	87.79	0.54	160.13	0.1500	0.0019	9.1353	0.0822	0.4417	0.0028	2346	7	2352	8	2358	13
A416	82.65	108.35	0.76	194.83	0.1513	0.0018	9.1255	0.0717	0.4377	0.0026	2360	6	2351	7	2340	12
A417	86.88	81.11	1.07	113.93	0.1161	0.0015	5.4493	0.0536	0.3406	0.0022	1897	9	1893	8	1889	10
A418	101.57	160.39	0.63	281.91	0.1436	0.0016	8.4401	0.0599	0.4263	0.0024	2271	6	2279	6	2289	11
A422	83.16	163	0.51	295.39	0.1523	0.0017	9.2463	0.0652	0.4405	0.0025	2372	5	2363	6	2353	11
A423	124.67	202.54	0.62	367.91	0.1504	0.0016	9.1121	0.0838	0.4395	0.0026	2350	19	2349	8	2349	12
A424	118.2	258.14	0.46	392.84	0.1343	0.0015	6.8546	0.0457	0.3703	0.0020	2155	5	2093	6	2031	10
A425	77.7	161.07	0.48	294.35	0.1520	0.0017	9.3245	0.0662	0.4449	0.0025	2369	6	2370	7	2372	11
A426	173.35	302.53	0.57	473.72	0.1502	0.0016	7.8991	0.0503	0.3814	0.0021	2349	5	2220	6	2083	10
A427	26.7	40.71	0.66	76.61	0.1573	0.0025	9.9451	0.1334	0.4585	0.0039	2427	12	2430	12	2433	17
A429	87.18	211.31	0.41	377.91	0.1490	0.0015	8.9110	0.0728	0.4338	0.0025	2334	17	2329	7	2323	11
A430	92.45	122.14	0.76	223.67	0.1519	0.0018	9.3558	0.0702	0.4469	0.0026	2367	6	2374	7	2381	12
A431	47.97	122.59	0.39	220.32	0.1540	0.0018	9.3184	0.0681	0.4388	0.0025	2391	6	2370	7	2345	11
A432	157.62	435.17	0.36	695.41	0.1443	0.0016	7.7661	0.0515	0.3904	0.0022	2279	5	2204	6	2125	10
A433	172.33	524.87	0.33	746.66	0.1441	0.0013	6.9003	0.0484	0.3472	0.0019	2277	16	2099	6	1921	9
A434	73.96	248.38	0.30	384.57	0.1396	0.0013	7.2770	0.0551	0.3781	0.0021	2222	17	2146	7	2067	10
A439	42.77	77.09	0.55	134.72	0.1492	0.0019	8.7970	0.0943	0.4278	0.0028	2336	22	2317	10	2296	12
A440	93.58	294.05	0.32	538.04	0.1545	0.0017	9.5579	0.0597	0.4488	0.0024	2396	5	2393	6	2390	11
A442	67.35	48.61	1.39	66.69	0.1180	0.0017	5.4796	0.0641	0.3369	0.0023	1926	11	1897	10	1872	11
A443	84.08	126.81	0.66	228.15	0.1536	0.0019	9.3628	0.0774	0.4420	0.0027	2387	7	2374	8	2360	12
A445	168.31	463.85	0.36	655.4	0.1424	0.0013	6.8111	0.0497	0.3468	0.0019	2257	16	2087	6	1919	9
A446	89.41	260.81	0.34	389.34	0.1424	0.0016	7.2116	0.0481	0.3673	0.0020	2256	5	2138	6	2017	9
A447	77.1	203.62	0.38	372.92	0.1524	0.0017	9.4756	0.0629	0.4509	0.0025	2373	5	2385	6	2399	11
A448	44.21	130.08	0.34	223.52	0.1456	0.0015	8.4662	0.0728	0.4217	0.0025	2295	18	2282	8	2268	11
A449	49.44	268.61	0.18	415.51	0.1342	0.0012	7.0311	0.0501	0.3801	0.0021	2153	16	2115	6	2077	10
A450	56.17	97.26	0.58	182.24	0.1612	0.0019	10.2713	0.0795	0.4620	0.0028	2469	6	2460	7	2448	12