

准噶尔盆地南缘头屯河地区砂岩型铀矿铀源区 及其成矿构造背景分析

——来自碎屑锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素的证据

耿英英¹⁾, 刘章月^{1,2)}, 何中波¹⁾, 黄少华¹⁾, 郭强¹⁾, 许强¹⁾, 宋继叶¹⁾

1) 核工业北京地质研究院, 北京, 100029;

2) 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京, 100083

内容提要: 准噶尔盆地是我国重要的多能源矿产产出盆地之一, 而准噶尔盆地南缘头屯河地区也是我国砂岩型铀矿找矿的优选区段, 为了厘定头屯河地区砂岩型铀矿赋矿层位沉积期的源区位置、母岩岩性及时代, 本文在野外地质调查的基础上, 对头屯河地区砂岩型铀矿赋矿层中的碎屑锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 定年和 Hf 同位素分析, 建立了碎屑锆石的 U-Pb 年龄及 Hf 模式年龄谱系。通过与周缘岩浆活动时代对比, 并结合古流向数据进一步分析赋矿层位沉积期的源区位置及母岩岩性, 讨论砂岩型铀矿的铀源条件。对采自侏罗系和下白垩统的 4 个砂岩样品进行碎屑锆石年龄分析表明: 碎屑锆石 U-Pb 年龄存在 140~180 Ma、240~320 Ma、340~420 Ma、440~480 Ma 四个主峰值年龄段, 年龄较平均的分布在 210~480 Ma 宽泛的区间内。研究表明头屯河地区早侏罗世物源来自北天山; 中侏罗世物源来自中、南天山; 中侏罗晚期开始转变为以北天山为主; 早白垩世物源大部分来自中、北天山, 少量来自博格达山地区。砂岩型铀矿化层铀源主要来自南侧天山地区的古生代中酸性火成岩, 其成矿作用应该发生在盆地处于较稳定的构造环境中。

关键词: 准噶尔盆地南缘; 砂岩型铀矿; 铀源; 碎屑锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素

我国北方的地浸砂岩型铀矿主要产于中、新生代盆地的盆山结合部位, 如伊犁盆地南缘、吐鲁番—哈密盆地南缘、鄂尔多斯盆地北部等。这些砂岩型铀矿的控矿因素主要包括铀源、赋矿围岩的沉积环境、砂体厚度及还原容量和区域构造活动等(黄世杰, 1994; 陈祖伊, 2002; 王果, 2002; 陈戴生等, 2006)。准噶尔盆地是我国重要的多旋回叠合盆地, 位于吐鲁番—哈密盆地和伊犁盆地之间, 且在中新生代经历了与吐鲁番—哈密盆地和伊犁盆地相似的构造演化历史, 是我国重要的产煤、石油和天然气等能源的盆地, 但至今却没有发现砂岩型铀矿床, 只是在地表发现铀矿化。

准噶尔盆地南缘头屯河地区作为砂岩型铀矿优选区段, 发现了大量铀矿化点, 形成了砂岩型铀矿化带(刘章月等, 2017), 显示出良好的开发前景(林双幸和师志龙, 2000; 林双幸和王果, 2003; 陈正乐等, 2006, 2010; 金若时等, 2014; 王果等, 2016; 秦明宽等, 2017)。对准噶尔盆地南缘的构造和沉积

演化, 前人已开展了大量的研究, 主要集中在准噶尔盆地南缘的变形特征(汪新伟等, 2005; 陈书平等, 2007)、演化历史(方世虎等, 2004; Fang Yanan et al., 2015; Yang Yongtai et al., 2015), 天山山脉的隆升历史和机制(Hendrix et al., 1994; 张文高等, 2017)准噶尔盆地南缘中—新生代地层的物源(武富礼和姚志刚, 2011; 李忠等, 2012; 陈熠等, 2012; 李忠和彭守涛, 2013; Fang Yanan et al., 2015)以及盆地的沉积响应(Hendrix et al., 1992, 1994; 柳永清等, 2004; 李忠等, 2012; 李忠和彭守涛, 2013; Fang Yanan et al., 2015)等方面。针对准噶尔盆地南缘砂岩型铀矿, 前人也进行了探讨(耿英英等, 2013; 刘章月等, 2015, 2017; 宋继叶等, 2015; 何中波等, 2016; 黄少华等, 2016a, b; 杨烨和何中波, 2016; 金若时等, 2017)。然而目前对砂岩型铀矿含矿层位的物源区、铀矿铀源与蚀源区岩性特征等方面还缺乏深入研究。砂岩型铀矿的铀源往往来源于铀含量较高且其中“活性铀”份额高的中酸性火成

注: 本文为国防预研项目(编号:3210402)和国家自然科学基金资助项目(编号:41902084)的成果。

收稿日期:2019-05-28; 改回日期:2020-02-08; 责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2020.02.010

作者简介:耿英英,女,1981年生,硕士,工程师,主要从事砂岩型铀矿成矿规律与成矿预测研究; Email: gyy928@163.com。

岩(宋继叶等, 2015),因此,对准噶尔盆地南缘头屯河地区广泛发育的中生代碎屑岩沉积,进行碎屑锆石定年及 Hf 同位素分析,不仅可以查明头屯河地区赋矿层位沉积期的源区位置、母岩岩性与时代等源区特征,而且对于进一步深入理解准噶尔盆地南缘构造演化,加快准噶尔盆地南缘矿产资源的勘探开发也具有重要的理论指导意义。

本文利用碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年、Hf

同位素分析方法,对头屯河地区砂岩型铀矿化赋矿层中的碎屑锆石进行了精细定年和 Hf 同位素分析,获得了碎屑锆石的 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征;通过古流向分析、与物源区年代学、Hf 同位素特征以及古地理演化过程对比分析,对准噶尔盆地南缘侏罗系—早白垩世地层物源区进行了探讨,并厘定了头屯河地区砂岩型铀矿化赋矿层的铀源区位置、岩性及时代。

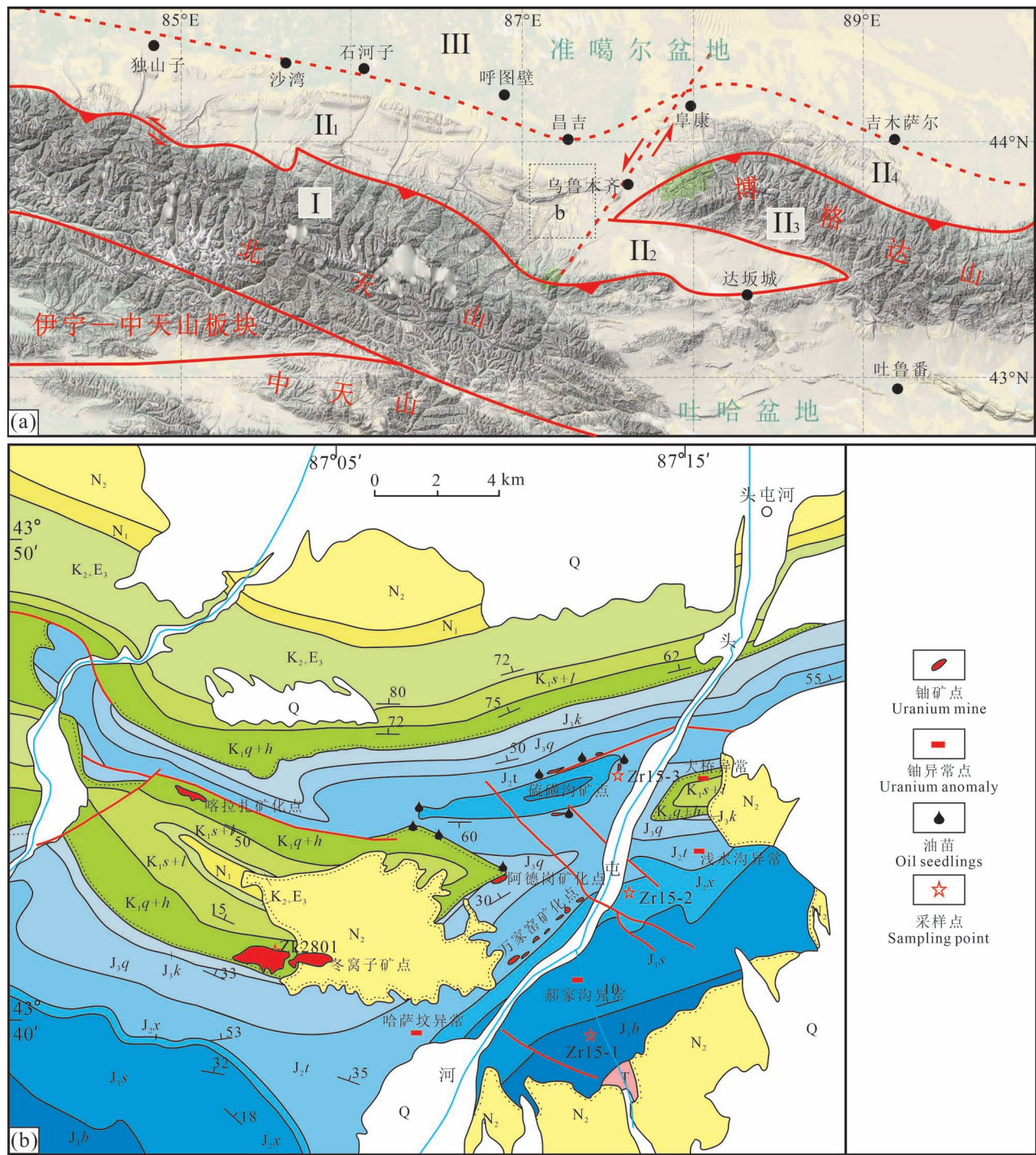


图 1 准噶尔盆地南缘构造分区图

Fig. 1 Structural map of the southern margin of the Junggar Basin

I—北天山构造区; II—准噶尔盆地南缘褶皱—断裂构造区; II₁—西部断褶构造带; II₂—柴窝堡—达坂城凹陷构造带; II₃—博格达基底冲断带; II₄—博格达山前逆冲推覆带; III—准噶尔盆地南缘构造区

Q—第四系; N₂—上新统; N₁—中新统; K₂+E₃—上白垩统一渐新统; K₁s+l—下白垩统连木沁组、胜金口组; K₁q+h—下白垩统呼图壁组、清水河组; J₃k—喀拉扎组; J₃q—齐古组; J₂t—头屯河组; J₂x—西山窑组; J₁s—三工河组; J₁b—八道湾组; T—三叠系

I—Northern Tianshan tectonic belt; II—fold—fault structure zone in the southern margin of the Junggar Basin; II₁—western fault—fold structural belt; II₂—Chaiwopu—Dabancheng sag structural belt; II₃—Bogda base thrust belt; II₄—Bogda mountain front thrust belt; III—southern tectonic area of Junggar Basin

Q—Quaternary; N₂ Pliocene; N₁—Miocene; K₂+E₃ Upper Cretaceous—Oligocene; K₁s+l Lower Cretaceous Lianmuqin Formation and Shengjinkou Formation; K₁q+h—Lower Cretaceous Hutubi Formation and Qingshuihe Formation; J₃k—Upper Jurassic Kalasha Formation; J₃q—Upper Jurassic Qigu Formation; J₂t—Middle Jurassic Toutunhe Formation; J₂x—Middle Jurassic Xishanyao Formation; J₁s—Lower Jurassic Sangonghe Formation; J₁b—Lower Jurassic Badaowan Formation; T—Triassic

1 地质背景

准噶尔盆地南缘西段以天山北缘大断裂带为界与北天山相连,东段也是以山前断裂带为界与博格达山相邻,是天山和准噶尔盆地盆山耦合的结合部位,跨天山山系和准噶尔盆地两大构造区(图 1a),包括北天山构造区(包括北天山褶皱带北部及其山间残留盆地)和准噶尔盆地南缘褶皱—断裂构造区两个构造单元。其中盆地南缘褶皱—断裂构造区可以进一步划分为西部断褶构造带、柴窝堡—达坂城断陷构造带和博格达山前逆冲推覆带三个次级构造单元,西部为较明显的三排背斜断裂构造带,而东部博格达山前则为典型的逆冲推覆的断块状构造带。

准噶尔盆地南缘晚古生代以来经历了多期构造运动,中生代以来进入陆内演化阶段,特别是新生代受到南侧印度和欧亚板块碰撞的影响,天山山脉快速隆升,向两侧盆地强烈逆冲,导致中生代地层发生强烈变形(Windley et al., 1990; Hendrix et al., 1992, 1994; 刘和甫等, 1994; 张培震等, 1996)。

准噶尔盆地南缘中、新生界盖层出露较齐全,赋矿层位主要为侏罗系和白垩系(图 1b),且二者之间不整合接触,而侏罗系直接不整合覆盖于三叠系之上。中—下侏罗统是形成于温暖潮湿气候下的含煤碎屑沉积,上侏罗统形成于干旱环境下的河湖相沉积(图 2a)。八道湾组为辫状河三角洲相沉积,岩性以灰色、灰绿色中粗砂岩、砾岩与细砂岩为主(图 2b),夹有粉砂岩和深灰色炭质泥岩和薄层煤线;三工河组整体为一套河湖相细碎屑沉积物,以灰绿色、

深灰色泥岩和砂岩不等厚互层为特点,总体上以泥岩为主;西山窑组为侏罗系主要含煤岩组,以灰色、灰黑色砂、泥岩互层夹煤层为特点,总体以细碎屑组份为主,厚层状砂岩少见,砂岩中碳屑含量较高;头屯河组形成于炎热半干旱气候下的河湖相沉积,以杂色泥岩、粉砂质泥岩与砂岩互层为特点(图 2c),夹薄层砾岩、煤线和泥灰岩;上侏罗统齐古组和喀拉扎组岩石整体为棕红色、黄红色山麓相,巨厚层泥砂质砾岩(图 2d),几乎不含有机质;下白垩统是河流相碎屑沉积。铀矿化点、异常点赋存于侏罗系和白垩系内灰色、灰绿色氧化砂岩和砂砾岩层,铀矿体受砂体展布控制明显。

2 样品采集与测试

用于碎屑锆石定年的砂岩样品分别采自头屯河地区砂岩型铀矿化不同的赋存层位(表 1,图 3),所测数据完全能满足准噶尔盆地南缘砂岩型铀矿赋矿层位沉积物源的特征分析要求。

表 1 准噶尔盆地南缘头屯河地区侏罗系—白垩系碎屑锆石 U-Pb 定年样品岩性

Table 1 Lithology of the detrital zircon U-Pb dating samples from the Jurassic and Cretaceous in Toutunhe area, southern margin of the Junggar Basin

样号	层位	经度	纬度	岩性
Zr-15-1	J ₁ b	87°12'09.31"	43°39'39.02"	灰白色漂白粗砾岩
Zr-15-2	J ₂ x	87°12'22.58"	43°42'32.15"	灰色含砾粗砂岩
Zr-15-3	J ₂ t	87°12'55.46"	43°45'05.57"	褐黄色氧化砂岩
zk2801	K ₁ q			灰色—灰绿色中粗粒砂岩

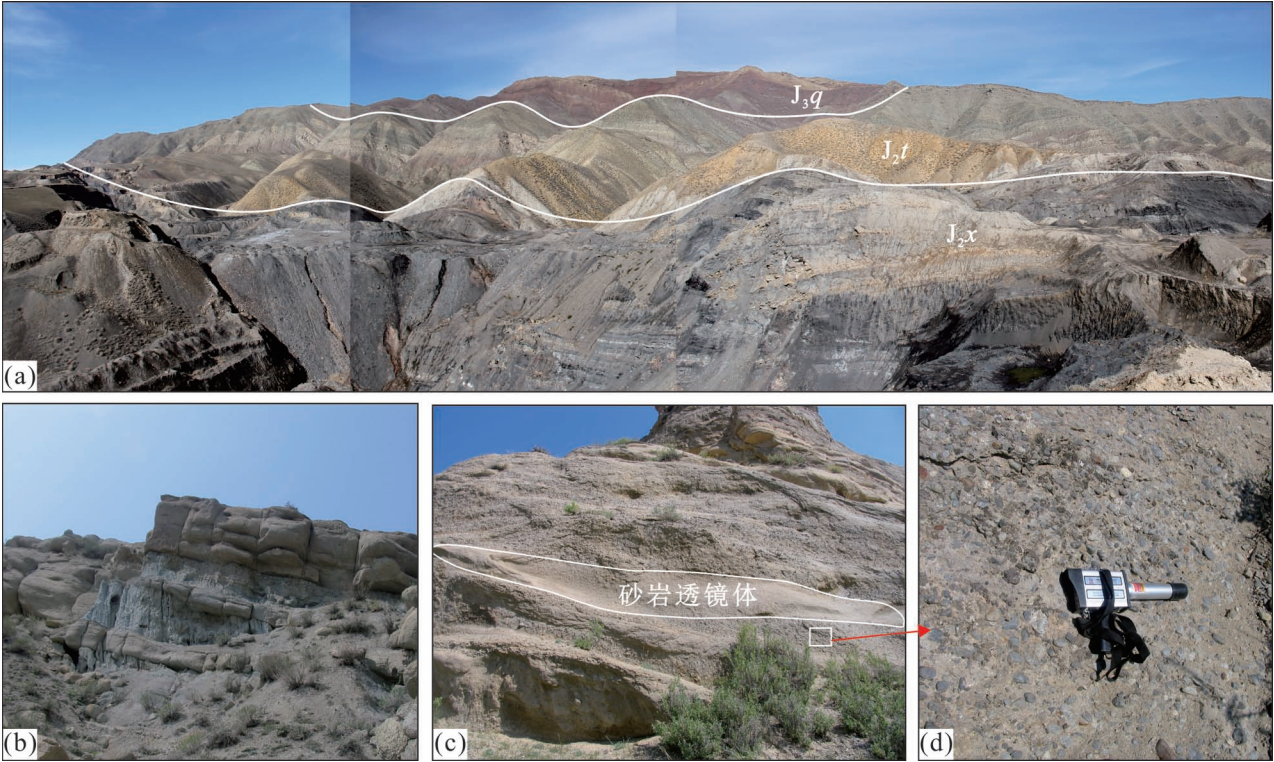


图 2 准噶尔盆地南缘头屯河地区地层露头照片

Fig. 2 Outcrop photos of the strata in the Toutunhe area, southern margin of the Junggar Basin

(a)中—上侏罗统;(b) J_1b 砾岩层夹泥岩层;(c) J_2t 砾岩层中夹的薄层砂岩透镜体;
(d) J_2t 砾岩,砾石成分主要以基性灰黑色变质石英岩,灰岩以及基性火成岩为主

(a) Middle—Upper Jurassic; (b) J_1b conglomerate interbedded with mudstone; (c) J_2t thin layered sandstone lens sandwiched in conglomerate; (d) J_2t conglomerate, the gravel composition is mainly composed of basic gray-black metamorphic quartzite, limestone and basic igneous rocks

锆石激光剥蚀等离子质谱 (LA-ICP-MS) U-Pb 同位素分析在在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,实验采用的测试仪器为美国 Agilent 公司生产的 Agilent7500a,激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas2005,分析所用的激光斑束直径为 32 μm ,分析流程参见 (Yuan Honglin et al. , 2004)。锆石 U-Pb 同位素数据处理采用 ICPMSDataCal10.8 程序完成。普通 Pb 校正采用 (Andersen, 2002) 介绍的方法,年龄计算及谐和图、频率分布图的绘制采用 Isoplot4.15 完成 (Ludwig, 2012)。

Lu-Hf 同位素分析是在中国科学院地质与地球物理研究所利用 Neptune 型多接受电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS) 完成,激光取样系统采用德国 Lamda Physik 公司制造的 Geolas193 nm 准分子激光取样系统。激光斑束直径 60 μm ,剥蚀频率 8

Hz,能量密度为 15~20 J/cm^2 ,剥蚀时间 60 s。详细的分析流程见 (Wu Fuyuan et al. , 2006) 和 (Xie Liewen et al. , 2008) 等。

锆石 Hf 同位素测定采用标准锆石 91500 进行同位素校正,Hf 同位素的仪器质量歧视校正取 $n(^{179}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf}) = 0.7325$ 。 ^{176}Yb 和 ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的同质异位干扰校正取 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{175}\text{Lu}) = 0.02655$ 和 $n(^{176}\text{Yb})/n(^{172}\text{Yb}) = 0.5887$ (Chu et al. , 2002),而 Yb 分馏校正则根据 $n(^{172}\text{Yb})/n(^{173}\text{Yb}) = 1.35272$ 用指数法则进行 (Wu Fuyuan et al. , 2006)。

3 结果分析

3.1 锆石 U-Pb 年代学

锆石 U-Pb 年代学测定结果见附表 1 [见网上 ([http://www. geojournals. cn/georev](http://www.geojournals.cn/georev) 或其他数据库)

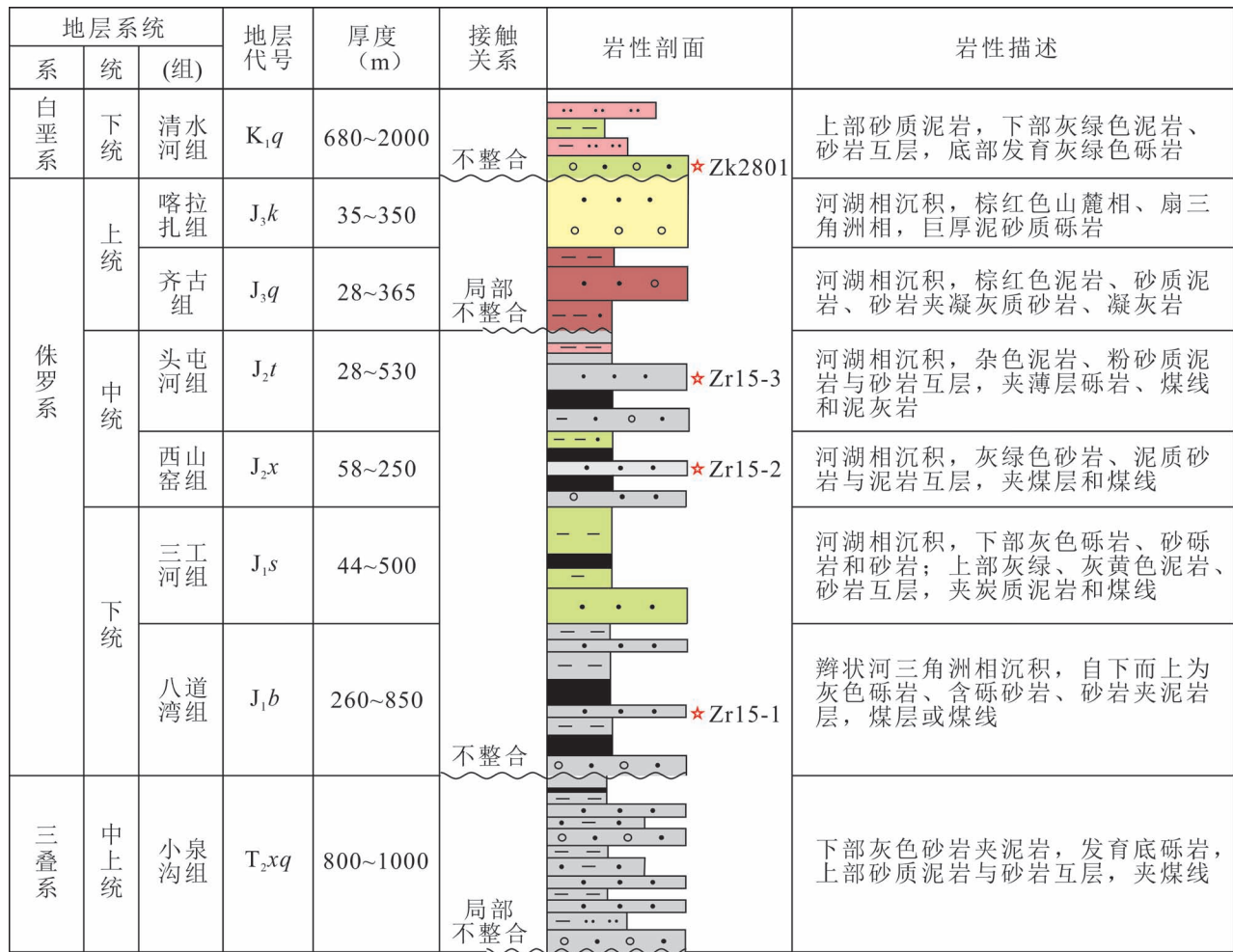


图 3 准噶尔盆地南缘头屯河地区地层特征
Fig. 3 Stratigraphy of the Toutunhe area in southern of Junggar Basin

电子文件,印刷版略]。CL 图像显示(图 4),样品锆石大小不等,部分呈次棱角状—混圆状,反映锆石经过一定距离的搬运或者经历了侵蚀和沉积循环过程,不少锆石还保有完好的晶形,表明为近源搬运,自形锆石多数发育振荡环带和明暗相间的结构特征,且绝大部分锆石的 Th/U 值大于 0.4,只有 1 个小于 0.1,说明本次采集样品锆石以岩浆成因为主(Corfu et al., 2003)。此外,还有一部分锆石的 Th/U 值位于 0.1~0.4 之间,可能反映其变质重结晶作用不彻底,或是受到后期地质事件改造的结果。

3.1.1 下侏罗统八道湾组(样品号 Zr15-1)

样品随机对 56 粒碎屑锆石进行了 U-Pb 定年测试,结果显示,有 6 粒谐和度低于 85%的锆石年龄认为是不谐和年龄,不加以考虑和讨论,50 粒谐和锆石的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 的年龄变化于 224 ± 3 Ma 和 493 ± 7 Ma 之间。从年龄频谱图上可以看出(图

5a),有两个明显的峰值 220~260 Ma(8)、280~350 Ma(36),也存在部分 440~500 Ma(5)的年龄。

3.1.2 中侏罗统西山窑组(样品号 Zr15-2)

样品随机对 67 粒碎屑锆石进行了 U-Pb 定年测试,结果显示,有 4 粒谐和度低于 85%的锆石年龄认为是不谐和年龄,不加以考虑和讨论;63 粒谐和锆石的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 的年龄变化于 242 ± 5 Ma 和 482 ± 7 Ma 之间。从年龄频谱图上可以看出(图 5b),年龄频谱图较为平均,主峰值 410~450 Ma(25),次峰值 340~380 Ma(16)。存在 1 颗锆石年龄为新元古代年龄,为 850 ± 17 Ma。

3.1.3 中侏罗统头屯河组(样品号 Zr15-3)

样品随机对 80 粒碎屑锆石进行了 U-Pb 定年测试,结果显示,有 9 粒谐和度低于 85%的锆石年龄认为是不谐和年龄,不加以考虑和讨论;70 粒谐和锆石的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 的年龄变化于 193 ± 4 Ma 和



图 4 准噶尔盆地南缘头屯河地区典型锆石微区 CL 图像

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images of typical detrital zircons from sandstones samples in the Toutunhe area, southern margin of the Jungar Basin
顶行标记为 U-Pb 年龄,底行为 T_{DM2}

The ages marked on top row are U-Pb age, on bottom row are T_{DM2}

536±8 Ma 之间,有一粒锆石年龄 2369 Ma。从年龄频谱图上可以看出(图 5c),锆石的年龄频谱图主峰值 240~340 Ma(42),次峰值 350~440 Ma(20),也存在部分 470~500 Ma(4)。存在 1 颗锆石年龄为古元古代年龄,为 2369±24 Ma。

3.1.4 下白垩统清水河组(样品号 ZK2801)

样品随机对 87 粒碎屑锆石进行了 U-Pb 定年测试,结果显示,锆石 U-Pb 同位素组成皆落在谐和曲线上,87 粒谐和锆石的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 的年龄变化主要介于 145±2 Ma 和 515±7 Ma 之间。从年龄频谱图上可以看出(图 5d),锆石的年龄频谱图出现两个明显的峰值 140~180 Ma(12)、255~445 Ma(69)。存在 2 颗锆石年龄为前寒武纪年龄,一颗新元古代,年龄 869±13 Ma,一颗古元古代,年龄 1664±19 Ma。

3.2 锆石 Hf 同位素特征

锆石 Hf 同位素特征测定结果见附表 2[见网上(<http://www.geojournals.cn/georev> 或其他数据库)电子文件,印刷版略]。在每个砂岩样品挑选了部分谐和度较高的碎屑锆石进行了原位微区 Hf 同位素分析测试。剔除 Hf 同位素信号较差数据外,除少数几颗锆石 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值大于 0.002 外,其它锆石的 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 比值均小于 0.002,说明在锆石形成后只有少量放射性 Hf 的累积。

下侏罗统八道湾组(样品号 Zr15-1)共测试了 15 个点的锆石 Hf 同位素原位分析,1 粒锆石(493 Ma)的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 0.282330, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -4.92, T_{DM2} 为 1.77 Ga,其余 14 粒锆石(224~342 Ma)的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 0.282536~0.282967, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -1.41~12.93, T_{DM2} 为 0.48~1.42 Ga。
中侏罗统西山窑组(样品号 Zr15-2)共测试了

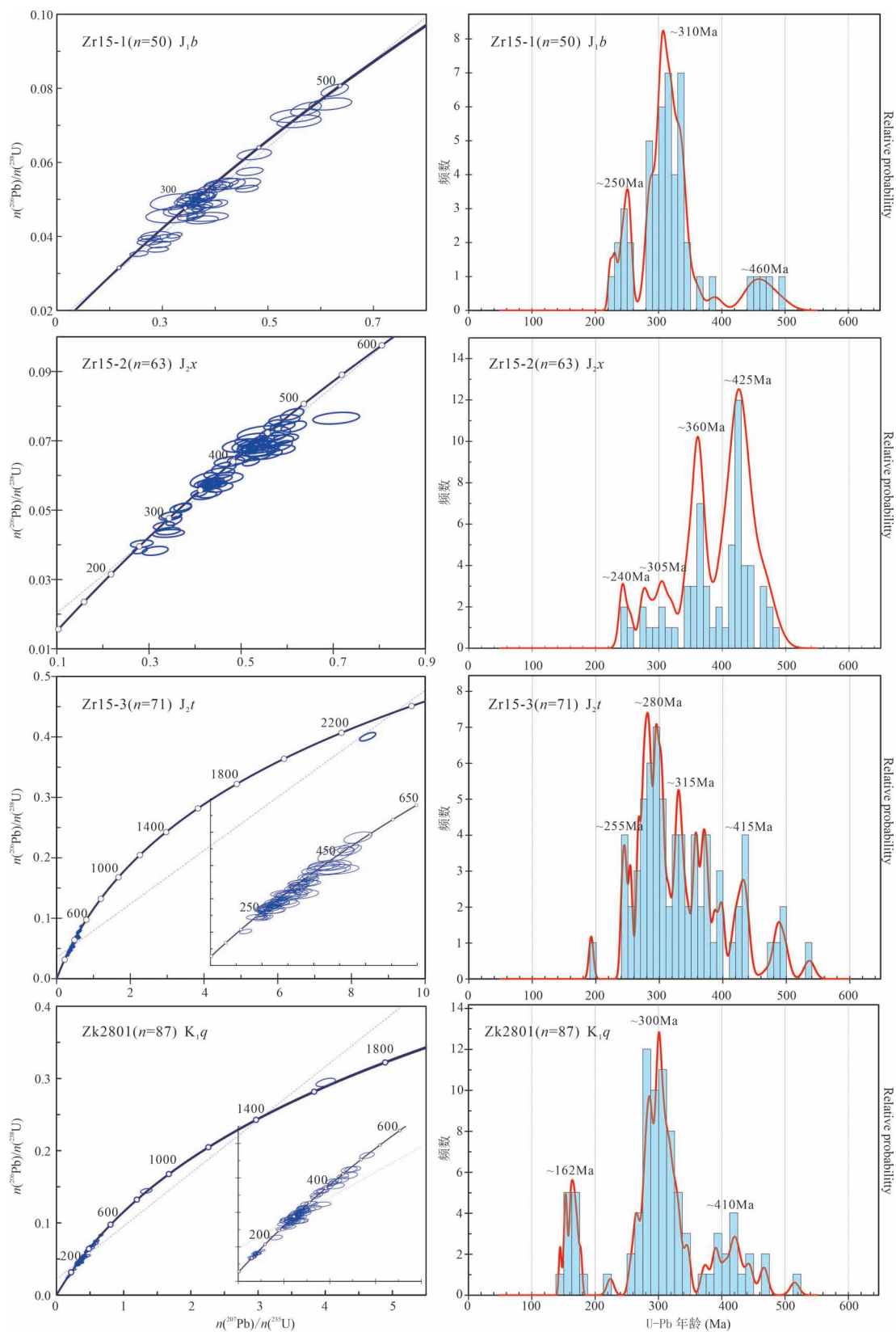


图 5 准噶尔盆地南缘头屯河地区侏罗系—白垩系碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图及 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄分布直方图

Fig. 5 U-Pb Concordia and histogram of detrital zircons from the Jurassic and Cretaceous in Toutunhe area, southern margin of the Junggar Basin

25 个点的锆石 Hf 同位素原位分析,1 粒锆石 (475 Ma) 的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 0.282114, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -13.03, T_{DM2} 为 2.26 Ga, 1 粒锆石 (464 Ma) 的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 0.282158, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -11.78, T_{DM2} 为 2.18 Ga, 2 粒锆石 (448 ~ 449 Ma) 的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 0.282345 ~ 0.282351, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -5.39 ~ -5.71, T_{DM2} 为 1.77 和 1.79 Ga, 1 粒锆石 (355 Ma) 的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 0.282383, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -6, T_{DM2} 为 1.73 Ga, 其余 20 粒锆石 (273 ~ 472 Ma) 的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 0.282461 ~ 0.282983, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -1.97 ~ 13.74, T_{DM2} 为 0.43 ~ 1.54 Ga。

中侏罗统头屯河组 (样品号 Zr15-3) 共测试了 26 个点的锆石 Hf 同位素原位分析,1 粒锆石 (499 Ma) 的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 0.282212, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -8.96, T_{DM2} 为 2.02 Ga, 1 粒锆石 (491 Ma) 的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 0.282260, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -7.47, T_{DM2} 为 1.93 Ga, 1 粒锆石 (536 Ma) 的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 0.282363, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -3.22, T_{DM2} 为 1.69 Ga, 其余 23 粒锆石 (241 ~ 437 Ma) 的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 0.282558 ~ 0.282949, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 0 ~ 13.18, T_{DM2} 为 0.50 ~ 1.35 Ga。

下白垩统清水河组 (样品号 ZK2801) 共测试了 30 个点的锆石 Hf 同位素原位分析,1 粒锆石 (465

Ma) 的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 0.282288, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -7.15, T_{DM2} 为 1.89 Ga, 1 粒锆石 (869 Ma) 的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 0.282262, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 0.96, T_{DM2} 为 1.69 Ga, 1 粒锆石 (166 Ma) 的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 0.282542, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -4.54, T_{DM2} 为 1.50 Ga, 其余 27 粒锆石 (161 ~ 515 Ma) 的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 0.282622 ~ 0.282967, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 3.11 ~ 13.76, T_{DM2} 为 0.45 ~ 1.01 Ga。

本次所测 4 件样品中锆石的 Hf 两阶段模式年龄分布范围较广,从 2.3 Ga 到 0.4 Ga,但主要集中在 0.4 ~ 1.4 Ga。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值由负到正 -13.03 ~ 13.76, 变化范围较大,但主要集中在 -2 ~ 13.76 之间,占总量的 89%,表明它们除了极少量是来自古老地壳的在循环物质外,大部分是新生地壳的物质来源 (图 6)。

4 讨论

4.1 准噶尔盆地南缘物源区地质背景

前人对准噶尔盆地南缘进行了大量详细的沉积学研究 (Hendrix et al., 1992; 方世虎等, 2005; 李玮等, 2007; 万延周等, 2009; 鲁彬等, 2010; 武富礼和姚志刚, 2011; Yang Wei et al., 2013; Fang Yanan et al., 2015), 研究表明早—中侏罗世准噶尔盆地南缘古流向主要为由南向北,天山地区成为盆地南缘

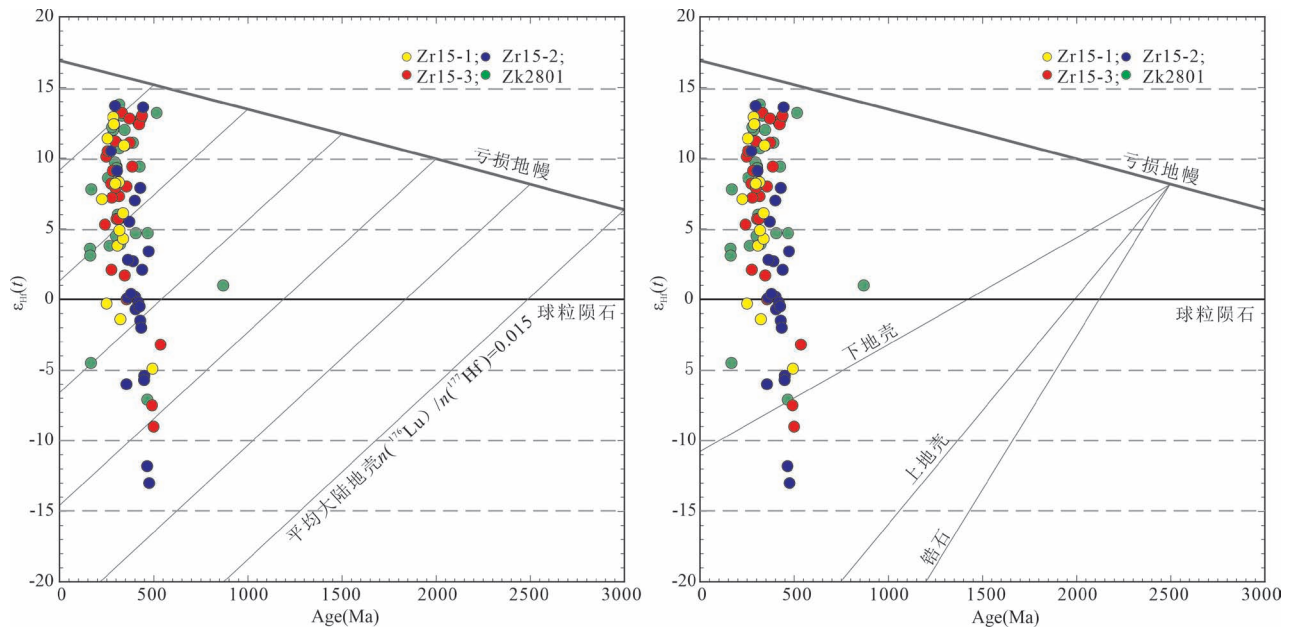


图 6 准噶尔盆地南缘头屯河地区侏罗系—白垩系碎屑锆石年龄与 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 关系图

Fig. 6 U-Pb age versus $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram of detrital zircons from the Jurassic and Cretaceous in Toutunhe area, southern margin of the Junggar Basin

最主要的物源区,同时天山物源体系对准噶尔盆地南缘的沉积作用具有绝对控制作用(Hendrix et al., 1992;方世虎等, 2005;李忠和彭守涛, 2013;Fang Yanan et al., 2015)。随着晚侏罗世—早白垩世时期拉萨地块和欧亚板块发生碰撞,天山地区也受此影响构造活动加强,山脉也开始隆升(Jolivet et al., 2010)。准噶尔盆地南缘也在此时期发育巨厚的红色冲积扇—辫状河沉积体系(Hendrix et al., 1992;方世虎等, 2005),古流向分析表明这时期盆地南缘东部地区可能受到南北两侧物源的影响,除天山地区外,博格达山也成为重要的物源体系(方世虎等, 2005)。因此,了解天山地区结晶岩年龄和 Hf 同位素特征的分布规律对于对比和确定准噶尔盆地南缘侏罗纪—早白垩世地层物源具有关键性的作用。

4.1.1 源区年龄构成

我们对截至目前已发表的准噶尔盆地南缘及天山地区的结晶岩年龄数据进行了统计整理,统计结果表明前寒武纪基底年龄分布在中天山及南天山,而北天山年龄主要集中在 360~280 Ma 年龄段内,缺乏前寒武纪的年龄记录(图 7),中、南天山地区新元古代年龄集中在 750~1070 Ma,显生宙年龄范围为 250~500 Ma。中南天山地区存在 3 组显生宙峰值年龄:480~400 Ma、360~320 Ma、300~250 Ma。李忠等(2013)也对天山及邻区已有的结晶岩年龄进行了整理统计,所统计文献来源和本文应该稍有不同,而且本文将近年来天山地区新发表的大量岩浆活动年龄数据加入统计,所获得的统计结果和李忠等(2013)基本一致,这也从另一方面印证了统计得到的年龄谱能够比较可靠地反映天山地区的结晶岩年龄分布。

4.1.2 源区 Hf 同位素特征

我们对前人发表的天山地区花岗岩锆石的 Hf 同位素数据进行的汇总分析,统计结果表明天山地区锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值整体分布在 -17~-16 的区间内,对应的二阶段模式年龄为 2.6 Ga~0.4 Ga。其中来自中天山南部的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要集中在 -18~-5 的范围,对应的二阶段模式年龄为 2.6 Ga~1.5 Ga;中天山中部和北部的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -5~8,对应的二阶段模式年龄

为 1.7 Ga~0.8 Ga;北天山的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 3~17,对应的二阶段模式年龄为 0.8 Ga~0.4 Ga(图 8)。可见天山地区 Hf 同位素特征具有明显的空间分布的规律,即由南向北天山地区不同块体之间 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和对应二阶段模式年龄数据有十分明显的差异,这对我们确定准噶尔盆地南缘的侏罗纪—早白垩世地层的物源能提供有力的约束。

4.1.3 天山地区中生代构造和古地理演化

天山地区属于中亚造山带这一典型的增生型造山带,形成于古生代时期不同块体的增生拼合(Windley et al., 2007)。晚泥盆世—早石炭世,塔

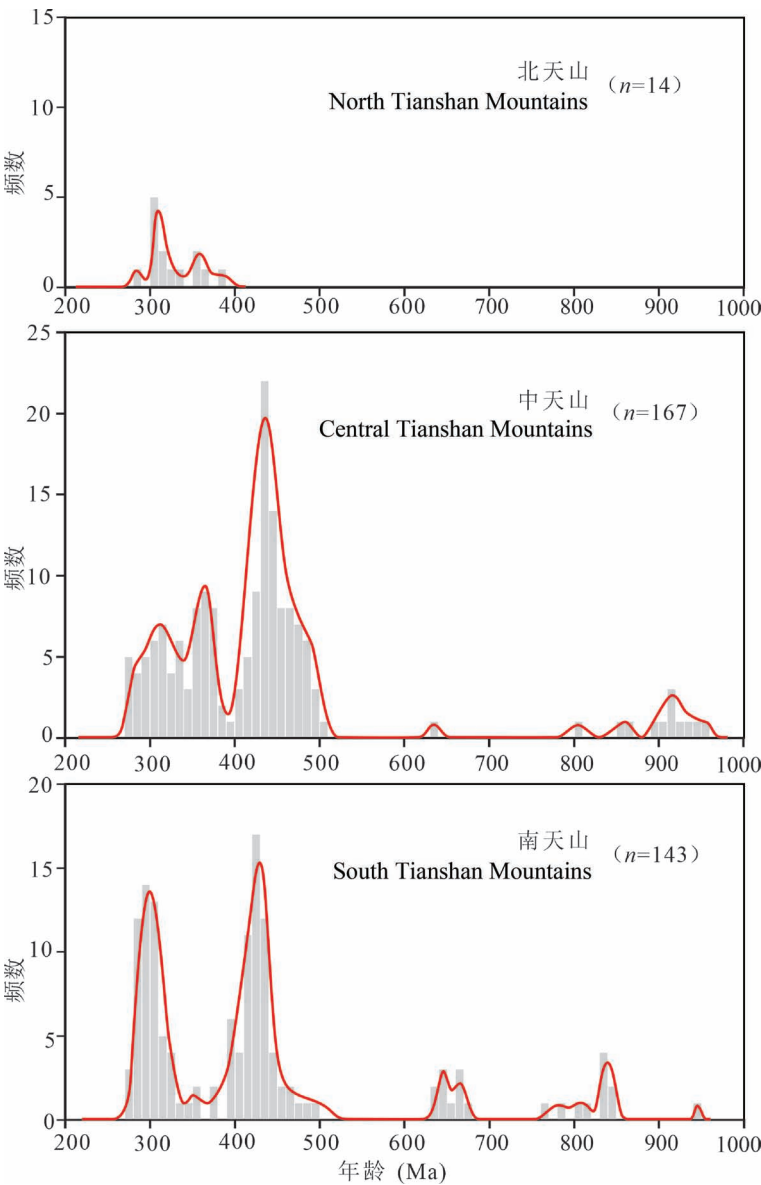


图 7 天山地区结晶岩年龄统计直方图

Fig. 7 Histograms and probability density plots of U-Pb age of crystalline rocks in Tianshan Mountains

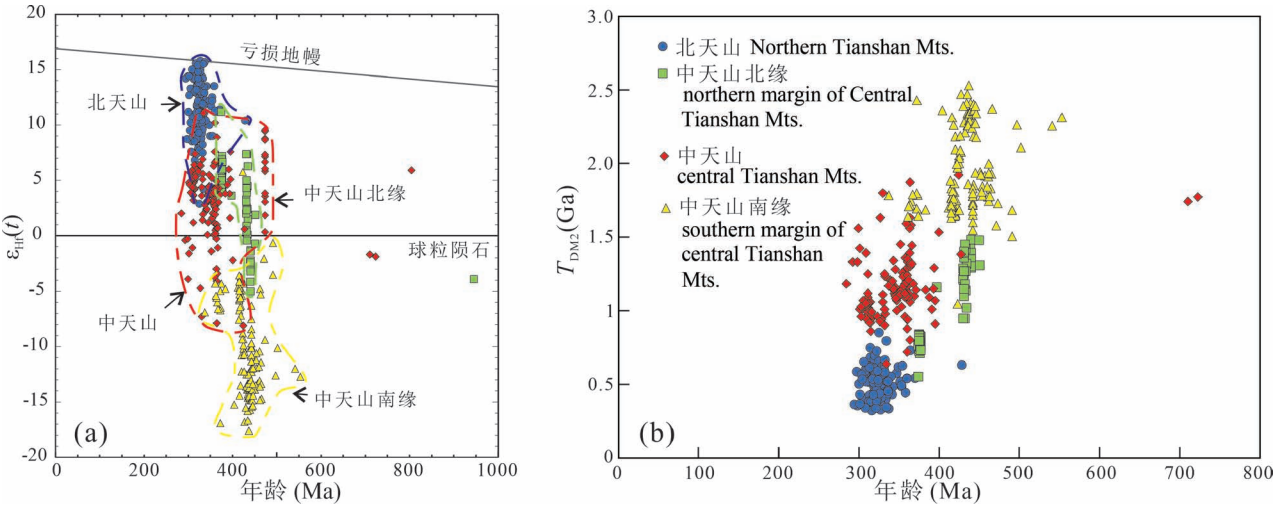


图 8 天山地区 Hf 同位素数据统计图:(a) 锆石 U-Pb 年龄与 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 关系图;(b) 锆石 U-Pb 年龄与二阶段模式年龄关系图

Fig. 8 Zircon Hf isotopic diagram in Tianshan Mountains area: (a) U-Pb age versus $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram; (b) U-Pb age versus T_{DM2}

Hf 同位素数据引自: 杨猛等, 2012;刘春花等, 2014;Shi Yuruo et al. , 2014; Zhong Linglin et al. , 2015; 尼加提·阿布都逊等, 2015;黄河等, 2015;李平等, 2017;贾晓亮等, 2017;Wang Meng et al. , 2018

Hf isotope data quoted from: Yang Meng et al. , 2012& Liu Chunhua et al. , 2014& Shi Yuruo et al. , 2014;Nijat Abdursul et al. , 2015& Zhong Linglin et al. , 2015; Huang He et al. , 2015& Li Ping et al. , 2017& Jia Xiaoliang et al. , 2017& Wang Meng et al. , 2018

里木地块和中天山地块碰撞拼合,在晚石炭世—早二叠世两者又和北天山地块拼贴在一起,之后又经历了造山带内部块体间的走滑剪切作用于早三叠世之前基本奠定了现今的构造格架(Windley et al. , 2007)。三叠纪—中侏罗世天山地区构造活动较弱,处于稳定接受剥蚀的阶段。晚侏罗世—早白垩世时期,拉萨地块与欧亚板块发生碰撞,天山地区受此影响构造活动开始活跃,北天山及博格达山开始隆升。新生代以来,受印度和欧亚板块碰撞的影响,天山造山带成为活跃的陆内造山带,持续的地壳缩短作用形成了现今天山山脉的地貌格局。我们对准噶尔盆地南缘侏罗纪—早白垩世地层物源的研究更重要的是了解当时的古地理面貌和盆山格局。古地貌重建工作表明中生代大部分时期天山地区没有发生快速和强烈的地形变化(Jolivet et al. , 2013; Morin et al. , 2019),这从另一方面说明天山地区中生代期间古地理环境总体比较稳定,没有遭受明显的构造作用的影响。

4.2 准噶尔盆地南缘头屯河地区侏罗系—早白垩统物源

4.2.1 下侏罗统八道湾组

样品锆石年龄范围在 224~493 Ma,主要峰值为

250 Ma 和 310 Ma,说明其物源是来自古生代—三叠纪的岩浆活动产物,其中石炭纪—二叠纪占主体。八道湾组古流向分析指示早侏罗世沉积时古流向为由南向北,表明其物源来自南侧的北天山地区(方世虎等, 2005)。北天山地区广泛分布泥盆纪—二叠纪中酸性火山岩、凝灰岩,如头苏泉组、雅满组、柳树沟组等,但奥陶纪—志留纪地层很不发育,而且缺乏这一时期火山活动的记录(李江海等, 2015)。八道湾组样品数据中缺乏 400~460 Ma 范围的年龄,这与北天山的地层发育情况是一致的。八道湾组碎屑锆石 Hf 同位素显示源区 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 总体较高,为 -1.41~12.93,对应的二阶段模式年龄为 0.48~1.42 Ga。样品的 Hf 同位素特征与北天山地区 Hf 同位素特征基本稳合(图 8)。综合以上分析,我们认为八道湾组物源主要来自准噶尔盆地南侧北天山地区泥盆纪—二叠纪中酸性岩浆物质。

4.2.2 中侏罗统西山窑组

沉积学研究显示中侏罗世西山窑组古流向与早侏罗世相比并未发生明显变化,仍然显示由南向北的流向(方世虎等, 2005),但不同地层的沉积相范围存在明显的变化,主要表现在自八道湾组沉积期开始,至西山窑组沉积期,头屯河地区经历了一次大

规模的湖侵事件,湖岸线向蚀源区推进,三工河组沉积时期的湖侵范围最大,头屯河地区从下侏罗统八道湾组的辫状河三角洲沉积逐渐演化为下侏罗统三工河组的滨浅湖相,中侏罗统西山窑组半深湖相沉积。沉积学研究表明早—中侏罗世本地区物源区处于稳定的构造环境。

样品的年龄数据在 242~482 Ma 之间,与八道湾组样品年龄相比,年龄分布更为平均,整体年龄有变老的趋势,中生代年龄比例减少而古生代年龄占比增加。值得注意的是奥陶纪—志留纪年龄在中侏罗统西山窑组样品中不仅大量存在,而且是占比最大的峰,这与早侏罗世八道湾组样品明显不同。区域地层以及同位素年龄统计数据表明中、南天山与北天山相比分布有更多的古生代地层和年龄。

西山窑组碎屑锆石 Hf 同位素显示 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 绝大部分(19 个点)在 -5~9.13 之间,其对应的二阶段模式年龄为 0.9~1.7 Ga,这应该来自于中天山中北部(图 8);另外有 3 个点的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 小于 -6,其对应的二阶段模式年龄大于 1.7 Ga,代表了来自中天山南部的源区。另外有 3 个点的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 大于 10,其对应的二阶段模式年龄小于 0.7 Ga,代表了少量来自北天山地区的物质。

因此,中侏罗世期间,头屯河地区物源除来自北天山外,来自中天山的部分逐渐增多甚至达到占主体的程度,也存在一部分来自更远处南天山的物源。由此表明这一时期持续的剥蚀作用造成天山地区整体地貌平缓,中、南天山地区的物质能够远距离搬运进入盆地内部。

4.2.3 中侏罗统头屯河组

样品年龄数据分布范围与西山窑组基本一致,但大部分年龄位于 225~415 Ma 之间,年轻年龄所占的比例明显比西山窑组高。年龄主要峰值为 255 Ma,280 Ma 和 315 Ma,与八道湾组峰值年龄比较类似。整体年龄表明整个中侏罗世期间头屯河地区一直在稳定接受沉积,而零星元古宙年龄的存在可能表明物源区深部基底已经被剥露出来。从 Hf 同位素数据来看,测试样品中 13 个点(占有测试点 50%) $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 8.22~13.18,对应的二阶段模式年龄为 0.5~0.8 Ga,代表了来自北天山地区的物质;10 个点的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 0~8.02,对应的二阶段模式年龄为 0.8~1.3 Ga,代表了来自中天山地区的物质;还有少量 3 个点的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -8.96~-3.22,对应的二阶段模式年龄大于 1.7 Ga,应该代表了物源来自中天山南部或南天山地区。中侏罗世晚期,头屯河地区

物源主要来自于北天山和中天山,与中侏罗世早期相比,沉积物来自北天山源区的比例明显增多,这指示了中侏罗世晚期,天山地区构造活动开始增强,天山地区的准平原化过程结束,头屯河地区主要物源区由中、南天山转移回北天山。前人对天山造山带及准噶尔盆地周缘的裂变径迹和古地貌重建工作也表明这一时期北天山地区开始发生隆升(沈传波等,2008;李玮等,2010;汪新伟等,2007;郭召杰等,2006;高志勇等,2015;Jolivet et al.,2010)。物源区的转变以及古地理、古地貌演化都说明中侏罗世晚期是准噶尔盆地南缘重要的沉积—构造转折期

4.2.4 下白垩统清水河组

砂岩样品锆石年龄范围在 145~515 Ma。与中侏罗统样品数据相比,清水河组大于 200 Ma 部分的年龄分布非常一致,两者最明显的变化是在下白垩统地层中出现了一组 145~178 Ma 的年龄,峰值在 162 Ma 左右,表明锆石源区存在同期的岩浆活动。这一年龄峰值与(王思恩和高林志,2012)在准噶尔盆地南缘玛纳斯发现的上侏罗统齐古组凝灰岩 U-Pb 年龄(164.6±1.4 Ma)基本一致。最近(刘松柏等,2018,2019)在东天山博格达石结子、菜籽沟地区,新发现了晚侏罗世二长花岗岩(154.9±1.9 Ma)、闪长岩(152.7±1.8 Ma);在准噶尔东北缘富蕴县喀拉通克地区新发现了中早侏罗世粗安岩(181.9±0.7 Ma)。前人对准噶尔盆地南缘的碎屑锆石研究表明,早在中侏罗世晚期地层中就出现了这组相近的年龄峰值(Fang Yanan et al.,2015;Ji Hongjie et al.,2017;Yang Wei et al.,2013)。对上侏罗统至下白垩统的碎屑锆石研究也反映了相同的变化趋势(李忠和彭守涛,2013;李忠等,2012;武富礼和姚志刚,2011;杨甫等,2013),这些变化趋势暗示了晚侏罗世—早白垩世天山造山带和准噶尔盆地周缘存在相对大规模的岩浆活动。

清水河组样品中有 17 个点(占比超过 50%)的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 8.5~13.76,对应的二阶段模式年龄为 0.45~0.8 Ga,这代表了来自北天山地区的物质;7 个点的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 3.83~6.04,对应的二阶段模式年龄为 0.9~1.1 Ga,代表少部分来自中天山的物质;锆石年龄位于 161~168 Ma 范围的测试点对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -4.54~7.83,对应的二阶段模式年龄为 0.7~1.5 Ga,说明 145~178 Ma 这组年龄应该不是来自南侧的天山地区。

裂变径迹研究表明晚侏罗世开始博格达山发生隆升(沈传波等,2008;李玮等,2010;汪新伟等,

2007;郭召杰等, 2006;高志勇等, 2015),头屯河地区的古流向也发生变化,除了由南向北的古流向数据外,还存在自南东向北西方向的古流向(李玮等, 2007;Fang Yanan et al., 2015;Ji Hongjie et al., 2017)。自头屯河组沉积时期开始,头屯河地区地层中开始出现混合长英质/玄武质物源成分,这与博格达山发育的双峰式火山岩具有类似的物质组成。综合上述分析说明早白垩世头屯河地区的物源大部分来自南侧中、北天山,以北天山为主体,此外博格达山地区也成为本地区的物源区。

4.3 铀源区及成矿地质背景

富铀源区的存在对砂岩型铀矿来说是成矿的重要条件。前文分析表明头屯河地区侏罗系一早白垩世地层物源主要来自于南侧天山古生代的中酸性岩浆岩。对天山地区大量发育的岩体的地球化学研究表明这一地区的岩体铀含量较为富集,古生代岩体铀含量平均值超过 3×10^{-6} (贾晓亮等, 2017;冯光英等, 2016;朱涛等, 2012;李平等, 2017),个别岩体铀含量更加突出,如中天山北缘望峰地区花岗岩岩体可高达 9.45×10^{-6} (杨猛等, 2012),平均铀含量也高达 6.13×10^{-6} 。因此天山地区大量发育的富铀岩体为头屯河地区砂岩型铀矿的形成提供了很好的铀源基础。对天山地区中生代地貌演化的重建表明这一时期天山地区总体没有发生剧烈的隆升,而是稳定的接受剥蚀(Jolivet et al., 2013),这种物源区的条件也从另一方面说明砂岩型铀矿的成矿期间,盆地具有相对长期稳定的构造环境,有利于发生铀的氧化和还原作用,促使铀发生大规模的迁移。

5 结论

(1)准噶尔盆地南缘头屯河地区侏罗系一早白垩世碎屑锆石 U-Pb 年龄呈现 140~180 Ma、240~320 Ma、340~420 Ma、440~480 Ma 四个主峰值年龄段,样品总体分布较为一致,年龄较平均的分布在 210~480 Ma 宽泛的区间内。

(2)准噶尔盆地南缘头屯河地区早侏罗世物源来自北天山;中侏罗世物源来自中、南天山;中侏罗晚期开始转变为以北天山为主;早白垩世物源大部分来自中、北天山,少量来自博格达山地区。

(3)头屯河地区侏罗系和白垩系砂岩型铀矿化层铀源主要来自南侧天山地区的古生代中酸性火成岩。其中下侏罗统赋矿层位铀源来自北天山“活性铀”份额较高的中酸性火成岩,中侏罗统赋矿层铀源则主要来自中南天山的中酸性火成岩,上侏罗统

统赋矿层中铀源来自北天山部分开始增多,而下白垩统赋矿层位铀源大部分来自中、北天山的中酸性火成岩,还有少量来自博格达山地区双峰式火山岩。这些砂岩型铀矿应该形成于盆地处于较稳定的构造环境中。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

陈戴生, 李胜祥, 蔡煜琦. 2006. 我国中、新生代盆地砂岩型铀矿沉积环境研究概述. 沉积学报, 24 (2): 223~228.

陈书平, 漆家福, 于福生, 杨桥. 2007. 准噶尔盆地南缘构造变形特征及其主控因素. 地质学报, 81 (2): 151~157.

陈熠, 方小敏, 宋春晖, 孟庆泉. 2012. 准噶尔盆地南缘新生代沉积物碎屑锆石记录的天山隆升剥蚀过程. 地学前缘, 19 (5): 225~233.

陈正乐, 刘健, 宫红良, 郑恩玖, 王新华, 潘锦华. 2006. 准噶尔盆地北部新生代构造活动特征及其对砂岩型铀矿的控制作用. 地质学报, 80 (1): 101~111.

陈正乐, 鲁克改, 王果, 陈柏林, 王国荣, 郑恩玖, 崔玲玲, 丁文君. 2010. 准噶尔盆地南缘新生代构造特征及其与砂岩型铀矿成矿作用初析. 岩石学报, 26 (2): 457~470.

陈祖伊. 2002. 亚洲砂岩型铀矿区域分布规律和中国砂岩型铀矿找矿对策. 铀矿地质, 18 (3): 129~137.

方世虎, 郭召杰, 宋岩, 吴朝东, 张志诚, 王美娜, 范瑞东. 2005. 准噶尔盆地南缘侏罗纪沉积相演化与盆地格局. 古地理学报, 7 (3): 347~356.

方世虎, 郭召杰, 张志诚, 吴朝东, 王美娜, 袁庆东, 张锐. 2004. 天山北缘前陆冲断带形成时间的地层学证据. 新疆地质, 22 (1): 24~28.

冯光英, 杨经绥, 刘飞, 牛晓露, 高健. 2016. 新疆中天山干沟一带晚石炭世花岗岩的岩石成因及其地质意义. 中国地质, 43 (5): 1545~1557.

高志勇, 朱如凯, 冯佳睿, 李小陪, 赵雪松, 郭美丽. 2015. 库车坳陷侏罗系一新近系砾岩特征变化及其对天山隆升的响应. 石油与天然气地质, 36 (4): 534~544.

耿英英, 刘章月, 吴亚平. 2013. 准噶尔盆地南缘硫磺沟矿化带含矿岩石学及后生蚀变特征研究. 矿物学报, 33 (S2): 205~206.

郭召杰, 张志诚, 吴朝东, 方世虎, 张锐. 2006. 中、新生代天山隆升过程及其与准噶尔、阿尔泰山比较研究. 地质学报, 80 (1): 1~15.

何中波, 刘章月, 杨烨, 郭强, 宋继叶, 冀华丽. 2016. 准噶尔盆地中新生代构造沉积演化与砂岩型铀成矿作用关系探讨. 新疆地质, 34 (3): 410~417.

黄河, 王涛, 秦切, 侯继尧, 童英, 郭磊, 张磊, 王静, 梁昭元. 2015. 中天山巴仑台地区花岗质岩石的 Hf 同位素研究:对构造演化及大陆生长的约束. 地质学报, 89 (12): 2286~2313.

黄少华, 秦明宽, 刘章月, 毛丽华, 何中波, 许强. 2016a. 准噶尔盆地南缘硫磺沟地区铀矿化砂岩流体包裹体及有机地球化学特征. 地质学报, 90 (3): 475~488.

黄少华, 秦明宽, 刘章月, 许强, 郭强. 2016b. 成岩作用与油气侵位对砂岩铀成矿的约束——以淮南硫磺沟地区头屯河组砂岩铀成矿为例. 沉积学报, 34 (2): 250~259.

黄世杰. 1994. 层间氧化带砂岩型铀矿的形成条件及找矿判据. 铀

矿地质, 10 (1): 6~13.

贾晓亮, 翟明国, 郭瑞清, 尼加提·阿布都逊, 秦切. 2017. 新疆南天山泥盆纪钙碱性侵入岩的形成时代、地球化学特征及构造意义. 岩石学报, 33 (10): 3057~3075.

金若时, 程银行, 李建国, 司马献章, 苗培森, 王少轶, 奥琮, 里宏亮, 李艳锋, 张天福. 2017. 中国北方晚中生代陆相盆地红—黑岩系耦合产出对砂岩型铀矿成矿环境的制约. 中国地质, 44 (2): 205~223.

金若时, 黄澎涛, 苗培森, 冯晓曦, 汤超, 李光耀. 2014. 准噶尔盆地东缘侏罗系砂岩型铀矿成矿条件与找矿方向. 地质通报, 33 (2): 359~369.

李江海, 周肖贝, 李维波, 王洪浩, 刘仲兰, 张华添, 塔斯肯. 2015. 塔里木盆地及邻区寒武纪—三叠纪构造古地理格局的初步重建. 地质论评, 61 (6): 1225~1234.

李平, 朱志新, 穆利修, 王克卓, 王哲, 屈涛, 凤骏. 2017. 新疆中天山巴伦台地区花岗质侵入体地球化学、年代学研究及其构造意义. 地质学报, 91 (1): 80~93.

李玮, 胡健民, 黎敦朋, 刘金侠, 孙宜朴, 梁积伟. 2007. 新疆博格达山北缘晚古生代—中生代古水流样式转折及其构造意义. 沉积学报, 25 (2): 283~292.

李玮, 胡健民, 渠洪杰. 2010. 准噶尔盆地周缘造山带裂变径迹研究及其地质意义. 地质学报, 84 (2): 171~182.

李忠, 彭守涛. 2013. 天山南北麓中—新生界碎屑锆石 U-Pb 年代学记录、物源体系分析与陆内盆山演化. 岩石学报, 29 (3): 739~755.

李忠, 汤望新, 彭守涛, 徐建强. 2012. 准噶尔盆地南缘中—新生界碎屑锆石的 U-Pb 年代学和沉积学记录及其反映的盆山构造演化. 地质科学, 47 (4): 1016~1040.

林双幸, 师志龙. 2000. 准噶尔盆地北部层间氧化带砂岩型铀矿形成条件分析. 铀矿地质, 16 (4): 193~198.

林双幸, 王果. 2003. 新疆准噶尔盆地顶山地区下第三系层间氧化带砂岩型铀矿化的发现及其意义. 铀矿地质, 19 (5): 264~270.

刘春花, 吴才来, 郅源红, 雷敏, 秦海鹏, 李名则. 2014. 南天山拜城县波孜果尔 A 型花岗岩类锆石 U-Pb 定年及其 Lu-Hf 同位素组成. 岩石学报, 30 (6): 1595~1614.

刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 夏义平, 刘立群. 1994. 天山两侧前陆冲断系构造样式与前陆盆地演化. 地球科学, 19 (6): 727~741.

刘松柏, 窦虎, 李海波, 温志刚. 2019. 新疆东天山博格达地区晚侏罗世酸性侵入岩的发现、锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 38 (2): 288~294.

刘松柏, 窦虎, 张为民, 彭志军, 张雷, 张文瑞. 2018. 准噶尔东北缘喀拉通克地区侏罗纪粗安岩的发现及地质意义. 地质论评, 64 (6): 1519~1529.

刘章月, 秦明宽, 何中波, 耿英英, 邓攻读. 2015. 新疆头屯河地区砂岩型铀矿第二成矿斜坡带的发现及其找矿意义. 矿物学报, 35 (S1): 317.

刘章月, 秦明宽, 何中波, 郭强, 许强, 耿英英, 邓攻读. 2017. 准噶尔盆地南缘构造抬升剥蚀不均一性对砂岩型铀矿的制约. 大地构造与成矿学, 41 (5): 853~864.

柳永清, 王宗秀, 金小赤, 李涛, 李寅. 2004. 天山东段晚中生代—新生代隆升沉积响应、年代学与演化研究. 地质学报, 78 (3): 319~331.

鲁彬, 周立发, 白斌, 刘哲. 2010. 准噶尔盆地南缘艾维尔沟群物源与古流分析. 西北大学学报(自然科学版), 40 (1): 98~104, 125.

尼加提·阿布都逊, 扎日木合塔尔, 吴兆宁. 2015. 中天山卡瓦布拉克杂岩带中闪长岩的锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征. 吉林大学学报(地球科学版), 45 (6): 1702~1712.

秦明宽, 何中波, 刘章月, 郭强, 宋继叶, 许强. 2017. 准噶尔盆地砂岩型铀矿成矿环境与找矿方向研究. 地质论评, 63 (5): 1255~1269.

沈传波, 梅廉夫, 张士万, 刘麟, 汤济广, 周锋, 严淑澜, 骆吉春. 2008. 依连哈比尔尕山和博格达山中新代隆升的时空分异: 裂变径迹热年代学的证据. 矿物岩石, 28 (2): 63~70.

宋继叶, 秦明宽, 蔡煜琦, 何中波. 2015. 准噶尔盆地基底结构特征及其对砂岩型铀矿成矿的影响. 地质论评, 61 (1): 128~138.

万延周, 周立发, 白斌, 谢其锋, 蒲磊. 2009. 准噶尔盆地南缘水西沟群物源分析. 岩性油气藏, 21 (2): 35~41.

汪新伟, 汪新文, 刘剑平, 马永生. 2005. 准噶尔盆地南缘褶皱—逆冲断层带分析. 地质前缘, 12 (4): 411~421.

汪新伟, 汪新文, 马永生. 2007. 新疆博格达山晚中生代以来的差异剥露史. 地质学报, 81 (11): 1507~1517.

王果, 王国荣, 鲁克改, 唐湘飞. 2016. 准噶尔盆地铀矿地质工作回顾及今后找矿方向. 铀矿地质, 32 (6): 340~349.

王果. 2002. 新疆造山—造盆作用与砂岩型铀成矿. 新疆地质, 20 (2): 110~114.

王思恩, 高林志. 2012. 新疆准噶尔盆地侏罗系齐古组凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄. 地质通报, 31 (4): 503~509.

武富礼, 姚志刚. 2011. 碎屑锆石 U-Pb 定年在准噶尔盆地南缘物源研究中的应用. 西安石油大学学报(自然科学版), 26 (3): 6~13.

杨甫, 陈刚, 章辉若, 侯斌, 张甲明, 丁超, 胡延旭, 雷盼盼. 2013. 准噶尔盆地东北部 DB1 井中生界碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年. 兰州大学学报(自然科学版), 49 (3): 313~319.

杨猛, 王居里, 王建其, 党飞鹏. 2012. 新疆中天山北缘望峰地区花岗岩的地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成研究. 岩石学报, 28 (7): 2121~2131.

杨桦, 何中波. 2016. 准噶尔盆地中新代古气候演化特征及对砂岩型铀成矿作用的制约. 世界核地质科学, 33 (3): 140~145.

张培震, 邓起东, 杨晓平, 彭斯震, 徐锡伟, 冯先岳. 1996. 天山的晚新生代构造变形及其地球动力学问题. 中国地震, 12 (2): 127~140.

张文高, 陈正乐, 蔡琳博, 韩凤彬, 孙岳, 吴玉, 孟令通, 何江涛, 马骥, 杨斌. 2017. 西天山白垩纪隆升—剥露的裂变径迹证据. 地质学报, 91 (3): 510~522.

朱涛, 马中平, 徐学义, 王洪亮, 陈隽璐, 唐卓, 孙吉明. 2012. 中天山南缘那拉提构造带达格特闪长岩的年龄、地球化学特征及其构造意义. 地质通报, 31 (12): 1965~1972.

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report—²⁰⁴Pb. Chemical Geology, 192 (1~2): 59~79.

Chen Daisheng, Li Shengxiang, Cai Yuqi. 2006. Overview of the researches on sedimentary environment for sandstone-type uranium deposits in the Meso—Cenozoic basins of China. Acta Sedimentologica Sinica, 24 (2): 223~228.

Chen Shuping, Qi Jiafu, Yu Fusheng, Yang Qiao. 2007. Deformation characteristics in the southern margin of the Junggar Basin and their controlling factors. Acta Geologica Sinica, 81 (2): 151~157.

Chen Yi, Fang Xiaomin, Song Chunhui, Meng Qingquan. 2012. The uplift and erosion of the Tianshan Mountains recorded by detrital zircon geochronology from the Cenozoic sediments in the southern Junggar Basin. Earth Science Frontiers, 19 (5): 225~233.

Chen Zhengle, Liu Jian, Gong Hongliang, Zheng Enjiu, Wang Xinhua, Pan Jinhua. 2006. Cenozoic tectonic movement and its control on sandstone-type uranium deposits in northern Junggar Basin. Acta Geologica Sinica, 80 (1): 101~111.

Chen Zhengle, Lu Kegai, Wang Guo, Chen Bailin, Wang Guorong, Zheng Enjiu, Cui Lingling, Ding Wenjun. 2010&. Characteristics of Cenozoic structural movements in southern margin of Junggar basin and its' relationship to the mineralization of sandstone-type uranium deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 457~470.

Chen Zuyi. 2002&. Regional distribution regularity of sandstone uranium deposits in Asian continent and prospecting strategy for sandstone uranium deposits in China. *Uranium Geology*, 18(3): 129~137.

Chu N, Taylor R, Chavagnac V, Nesbitt R, Boella M, Milton J. 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: an evaluation of isobaric interference corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17(12): 1567~1574.

Corfu F, Hanchar J, Hoskin P, Kinny P. 2003. *Altas of zircon textures*. *Rev. Mineral Geochem.*, 53: 469~500.

Fang Shihu, Guo Zhaojie, Song Yan, Wu Chaodong, Zhang Zhicheng, Wang Meina, Fan Ruidong. 2005&. Sedimentary facies evolution and basin pattern of the Jurassic in southern margin area of Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography*, 7(3): 347~356.

Fang Shihu, Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng, Wu Chaodong, Wang Meina, Yuan Qingdong, Zhang Rui. 2004&. Stratigraphic evidences for dating of the foreland thrust, north Tianshan. *Xinjiang Geology*, 22(1): 24~28.

Fang Yanan, Wu Chaodong, Guo Zhaojie, Hou Kejun, Dong Lin, Wang Luxin, Li Linlin. 2015. Provenance of the southern Junggar Basin in the Jurassic: Evidence from detrital zircon geochronology and depositional environments. *Sedimentary Geology*. 315: 47~63.

Feng Guangying, Yang Jingsui, Liu Fei, Niu Xiaolu, Gao Jian. 2016&. Petrogenesis and geological significance of the Late Carboniferous granites from Gangou, Central Tianshan Mountains, Xinjiang. *Geology in China*, 43(5): 1545~1557.

Gao Zhiyong, Zhu Rukai, Feng Jianrui, Li Xiaopei, Zhao Xuesong, Guo Meili. 2015&. Jurassic—Neogene conglomerate characteristics in Kuqa Depression and their response to tectonic uplifting of Tianshan Mountains. *Oil and Gas Geology*, 36(4): 534~544.

Geng Yingying, Liu Zhangyue, Wu Yaping. 2013&. Study on ore-bearing petrology and epigenetic alteration of mineralization belt in Lihuanggou, southern Junggar Basin. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(S2): 205~206.

Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng, Wu Chaodong, Fang Shihu, Zhang Rui. 2006&. The Mesozoic and Cenozoic exhumation history of Tianshan and comparative studies to the Junggar and Altai Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 1~15.

He Zhongbo, Liu Zhangyue, Yang Ye, Guo Qiang, Song Jiye, Ji Huali. 2016&. Mesozoic—Cenozoic tectonic—sedimentary evolution and metallogenesis of sandstone-type uranium deposit in Junggar Basin. *Xinjiang Geology*, 34(3): 410~417.

Hendrix M, Dumitru T, Graham S. 1994. Late Oligocene—early Miocene unroofing in the Chinese Tian Shan: An early effect of the India—Asia collision. *Geology*, 22(6): 487~490.

Hendrix M, Graham S, Carroll A, Sobel E, Mcknight C, Schulein B, Wang Zuoxun. 1992. Sedimentary record and climatic implications of recurrent deformation in the Tian Shan: Evidence from Mesozoic strata of the north Tarim, south Junggar, and Turpan basins, northwest China. *Geological Society of America Bulletin*, 104(1): 53~79.

Huang He, Wang Tao, Qin Qie, Hou Jiyao, Tong Ying, Guo Lei, Zhang Lei, Wang Jing, Liang Zhaoyuan. 2015&. Zircon Hf isotopic characteristics of granitoids from the Baluntai region, Central Tianshan: Implications for tectonic evolution and continental growth. *Acta Geologica Sinica*, (12): 2286~2313.

Huang Shaohua, Qin Mingkuan, Liu Zhangyue, Mao Lihua, He Zhongbo, Xu Qiang. 2016a&. Fluid inclusion and organic geochemistry characteristics of uranium-bearing sandstone in the Lihuanggou area in the southern margin of Junggar Basin. *Acta Geologica Sinica*, 90(3): 475~488.

Huang Shaohua, Qin Mingkuan, Liu Zhangyue, Xu Qiang, Guo Qiang. 2016b&. Impact of diagenesis and hydrocarbon charging on sandstone uranium mineralization: An example of Toutunhe Formation in Lihuanggou area, southern Junggar Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(2): 250~259.

Huang Shijie. 1994&. Formation conditions and prospecting criteria for sandstone uranium deposition of interlayered oxidation type. *Uranium Geology*, 10(1): 6~13.

Ji Hongjie, Tao Huifei, Wang Qi, Qiu Zhen, Ma Dongxu, Qiu Junli, Liao Peng. 2018. Early to Middle Jurassic tectonic evolution of the Bogda Mountains, northwest China: Evidence from sedimentology and detrital zircon geochronology. *Journal of Asian Earth Sciences*, 153: 57~74.

Jia Xiaoliang, Zhai Mingguo, Guo Ruiqing, Nijiati Abuduxun, Qin Qie. 2017&. Geochronology and geochemistry characteristics of the Devonian calcium-alkaline intrusive rocks in Southern Tianshan and their tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 33(10): 3057~3075.

Jin Ruoshi, Cheng Yinhang, Li Jianguo, Sima Xianzhang, Miao Peisen, Wang Shaoyi, Ao Cong, Li Hongliang, Li Yangfeng, Zhang Tianfu. 2017&. Late Mesozoic continental basin “Red and Black” coupling for sandstone uranium mineralization in northern China. *Geology in China*, 44(2): 205~223.

Jin Ruoshi, Huang Pengtao, Miao Peisen, Feng Xiaoxi, Tang Chao, I Guangyaol. 2014&. Metallogenic conditions and prospecting targeting of the Jurassic sand type uranium deposits on the eastern margin of Junggar Basin. *Geological Bulletin of China*, 33(2): 359~369.

Jolivet M, Dominguez S, Charreau J, Chen Y, Li Yongan, Wang Qingchen. 2010. Mesozoic and Cenozoic tectonic history of the central Chinese Tian Shan: Reactivated tectonic structures and active deformation. *Tectonics*, 29(6): doi: 10. 1029/2010TC002712

Jolivet M, Heilbronn G, Robin C, Barrier L, Bourquin S, Guo Zh., Jia Y, Guerit L, Yang W, Fu B. 2013. Reconstructing the Late Palaeozoic — Mesozoic topographic evolution of the Chinese Tian Shan: available data and remaining uncertainties. *Advances in Geosciences*, 37: 7~18.

Li Jianghai, Zhou Xiaobei, Li Weibo, Wang Honghao, Liu Zhonglan, Zhang Huatian, Abitkazy Taskyn. 2015&. Preliminary reconstruction of tectonic paleogeography of Tarim Basin and its adjacent aeras from Cambrian to Triassic, NW China. *Geological Review*, 61(6): 1225~1234.

Li Ping, Zhu Zhixin, Mu Lixiu, Wang Kezhao, Wang Zhe, Qu Tao, Feng Jun. 2017&. Geochemistry and geochronology of granitoids intrusions from the Baluntai area in Central Tianshan Mountains, and its tectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 91(1): 80~93.

Li Wei, Hu Jianmin, Lu Duncpeng, Liu Jinxia, Sun Yipu, Liang Jiwei. 2007&. Analysis of the Late Paleozoic and Mesozoic paleocurrents

- and It's constructional significance of the northern Bogdshan, Xinjiang. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(2): 283~292.
- Li Wei, Hu Jianmin, Qu Hongjie. 2010&. Fission track analysis of Junggar Basin peripheral orogen and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 84(2): 171~182.
- Li Zhong, Peng Shoutao. 2013&. U-Pb geochronological records and provenance system analysis of the Mesozoic—Cenozoic sandstone detrital zircons in the northern and southern piedmonts of Tianshan, northwest China: Responses to intracontinental basin—range evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 739~755.
- Li Zhong, Tang Wangxin, Peng Shoutao, Xu Jianqiang. 2012&. Detrital zircon U-Pb geochronological and depositional records of the Mesozoic—Cenozoic profile in the southern Junggar Basin, northwest China, and their responses to basin—range tectonic evolution. *Chinese Journal of Geology*, 47(4): 1016~1040.
- Lin Shuangxing, Shi Zhilong. 2000&. Analysis on metallogenic conditions of sandstone-type uranium deposit in interlayer oxidation zone in the north of Junggar Basin, Xinjiang. *Uranium Geology*, 16(4): 193~198.
- Lin Shuangxing, Wang Guo. 2003&. Discovery of interlayer oxidation zone sandstone-type uranium mineralization in Lower Tertiary and its significance, Dingshan area, Junggar basin, Xinjiang. *Uranium Geology*, 19(5): 264~270.
- Liu Chunhua, Wu Cailai, Gao Yuanhong, Lei Min, Qin Haipeng, Li Mingze. 2014&. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Lu-Hf isotopic system of A-type granitoids in South Tianshan, Baicheng County, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1595~1614.
- Liu Hefu, Liang Huishe, Cai Ligu, Xia Yiping, Liu Liqun. 1994&. Tectonic styles and foreland basin evolution of foreland thrusts on both sides of Tianshan Mountains. *Earth Science*, 19(6): 727~741.
- Liu Songbai, Dou Hu, Zhang Weimin, Peng Zhijun, Zhang Lei, Zhang Wenrui. 2018&. Discovery of Jurassic trachyandesite and its geological significance in the northwestern of Junggar Basin. *Geological Review*, 64(6): 1519~1529.
- Liu Yongqing, Wang Zongxiu, Jin Xiaochi, Li Tao, Li Yin. 2004&. Evolution, chronology and depositional effect of uplifting in the eastern sector of the Tianshan Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 78(3): 319~331.
- Liu Zhangyue, Qin Mingkuan, He Zhongbo, Geng Yingying, Deng Gongdu. 2015&. Discovery and prospecting significance of the second metallogenic slope belt of sandstone-type uranium deposits in Toutunhe area, Xinjiang. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(S1): 317.
- Liu Zhangyue, Qin Mingkuan, He Zhongbo, Guo Qiang, Xu Qiang, Geng Yingying, du Deng Gong. 2017&. Tectonic uplift—denudation inhomogeneity and impacts on the sandstone-hosted uranium mineralization in the southern margin of the Junggar Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(5): 853~864.
- Lu Bin, Zhou Lifa, Bai Bin, Liu Zhe, Zhe Liu. 2010&. Provenance and palaeocurrent analysis of Aiweiergou Group in the southern margin of Junggar Basin. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 40(1): 98~104, 125.
- Ludwig K. 2012. User's Manual for Isoplot 3.75: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication No. 5: 1~75.
- Morin J, Jolivet M, Barrier L, Laborde A, Li Haibing, Dauteuil O. 2019. Planation surfaces of the Tian Shan Range (Central Asia): Insight on several 100 million years of topographic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 177: 52~65.
- Nijat Abdursul, Muhtar Zari, Wu Zhaoning. 2015&. Zircon U-Pb isotopic chronology and Hf isotopes of diorites from Kawabulak Complex, Central Tianshan. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 45(6): 1702~1712.
- Qin Mingkuan, He Zhongbo, Liu Zhangyue, Guo Qiang, Song Jiye, Xu Qiang. 2017&. Study on metallogenic environments and prospective direction of sandstone type uranium deposits in Junggar Basin. *Geological Review*, 63(5): 1255~1269.
- Shen Chuanbo, Mei Lianfu, Zhang Shiwan, Liu Lin, Tang Jiguang, Zhou Feng, Yan Shulan, Luo Jichun. 2008&. Fission-track dating evidence on space—time difference of Mesozoic—Cenozoic uplift of the Yilianhabierga Mountain and Bogeda Mountain. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(2): 63~70.
- Shi Yuruo, Jian Ping, Kröner Alfred, Jahn Bor-ming, Liu Dunyi, Zhang Wei, Ma Huadong. 2014. Zircon ages and Hf isotopic compositions of plutonic rocks from the Central Tianshan (Xinjiang, northwest China) and their significance for Early to Mid-Palaeozoic crustal evolution. *International Geology Review*, 56(11): 1413~1434.
- Song Jiye, Qin Mingkuan, Cai Yuqi, He Zhongbo. 2015&. Basement characteristics of Junggar Basin and its effect on sandstone-type uranium metallogenesis. *Geological Review*, 61(1): 128~138.
- Liu Songbai, Dou Hu, Li Haibo, Wen Zhigang. 2019&. Geological significance of the discovery of Late Jurassic intermediate—acidic intrusive rock in Bogeda area of East Tianshan, Xinjiang, and its U-Pb zircon age. *Geological Bulletin of China*, 38(2): 288~294.
- Wan Yanzhou, Zhou Lifa, Bai Bin, Xie Qifeng, Pu Lei. 2009&. Provenance analysis of Shuixigou Group in southern margin of Junggar Basin. *Lithologic Reservoirs*, 21(2): 35~41.
- Wang Guo, Wang Guorong, Lu Kegai, Tang Xiangfei. 2016&. Review on the uranium geology efforts and outlook for future exploration in Junggar Basin. *Uranium Geology*, 32(6): 340~349.
- Wang Guo. 2002&. Mountain—basin formation and sandstone-type uranium mineralization in Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 20(2): 110~114.
- Wang Meng, Zhang Jinjiang, Pei Xianzhi, Liu Kai, Zhang Bo, Chen Youxin. 2018. Significant Carboniferous magmatism and continental growth in the northern west Tianshan orogen, NW China: Revealed by detrital zircon U-Pb and Lu-Hf analyses for turbidites from the north Tianshan accretionary complex. *Journal of Geodynamics*, 118: 11~31.
- Wang Si'en, Gao Linzhi. 2012&. SHRIMP U-Pb dating of zircons from tuff of Jurassic Qigu Formation in Junggar Basin, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 31(4): 503~509.
- Wang Xinwei, Wang Xinwen, Liu Jianping, Ma Yongsheng. 2005&. Analysis of the fold—thrust zone in the southern Junggar Basin, northwestern China. *Earth Science Frontiers*, 12(4): 411~421.
- Windley B F, Allen M B, Zhang C, Zhao Z Y, Wang G R. 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tien Shan Range, central Asia. *Geology*, 18(2): 128~131.
- Windley B F, Alexeev D, Xiao Wenjiao, Kröner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31~47.
- Wu Fuli, Yao Zhigang. 2011&. Application of U-Pb dating in the study on the provenance analysis of detrital zircons in the southern margin of Junggar Basin, China. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 26(3): 6~13.
- Wu Fuyuan, Yang Yueheng, Xie Liewen, Yang Jinhui, Xu Ping. 2006.

Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1~2): 105~126.

Xie Liewen, Zhang Yanbin, Zhang Huihuang, Sun Jingfeng, Wu Fuyuan. 2008. In situ simultaneous determination of trace elements, U-Pb and Lu-Hf isotopes in zircon and baddeleyite. *Chinese Science Bulletin*, 53(10): 1565~1573.

Wang Xinwei, Wang Xinwen, Ma Yongsheng. 2007&. Differential exhumation history of Bogda Mountain, Xinjiang, Northwestern China Since the Late Mesozoic. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1507~1517.

Yang Fu, Chen Gang, Zhang Huiruo, Hou Bin, Zhang Jiaming, Ding Chao, U Yanxuh, Lei Panpan. 2013&. LA-ICP-MS U-Pb dating of detrital zircon from the Mesozoic sandstone core-samples in well DB1 of northeast Junggar Basin. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 49(3): 313~319.

Yang Meng, Wang Juli, Wang Jianqi, Dang Feipeng. 2012&. Studies on geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of granite in Wangfeng area at the northern margin of Middle Tianshan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2121~2131.

Yang Wei, Jolivet M, Dupont-Nivet G, Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng, Wu Chaodong. 2013. Source to sink relations between the Tian Shan and Junggar Basin (northwest China) from Late Palaeozoic to Quaternary: evidence from detrital U-Pb zircon geochronology. *Basin Research*. 25(2): 219~240.

Yang Ye, He Zhongbo. 2016&. Characteristics of Mesozoic—Cenozoic paleoclimate evolution and its constraint on mineralization of sandstone type uranium deposit in Junggar basin, Xinjiang, China. *World Nuclear Geoscience*, 33(3): 140~145.

Yang Yongtai, Song Chuanchun, He Sheng. 2015. Jurassic tectonostratigraphic evolution of the Junggar Basin, NW China: A record of Mesozoic intraplate deformation in Central Asia. *Tectonics*, 34(1): 86~115.

Yuan Honglin, Gao Shan, Liu Xiaoming, Li Huiming, Günther Detlef, Wu Fuyuan. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353~370.

Zhang Peizhen, Deng Qidong, Yang Xiaoping, Peng Sizhen, Xu Xiwei, Feng Xianye. 1996&. Late Cenozoic tectonic deformation and mechanism along the Tianshan Mountain, northwestern China. *Earthquake Research in China*, 12(2): 127~140.

Zhang Wengao, Chen Zhengle, Cai Linbo, Han Fengbin, Sun Yue, Wu Yu, Meng Lingtong, He Jiangtao, Ma Ji, Yang Bin. 2017&. Cretaceous uplifting—exhumation process of west Tianshan: Evidence from apatite fission track. *Acta Geologica Sinica*, 91(3): 510~522.

Zhong Linglin, Wang Bo, Shu Liangshu, Liu Hongsheng, Mu Lixiu, Ma Yuzhou, Zhai Yazhong. 2015. Structural overprints of early Paleozoic arc-related intrusive rocks in the Chinese Central Tianshan: Implications for Paleozoic accretionary tectonics in SW Central Asian Orogenic Belts. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 194~217.

Zhu Tao, Ma Zhongping, XU Xueyix, Wang Hongliang, Chen Juanlu, Tang Zhuo, Sun Jiming. 2012&. Geochemical and geochronological studies of Dagete diorite in Nalati magmatic belt of middle Tianshan Mountains. *Geological Bulletin of China*, 31(12): 1965~1972.

Provenance and ore-forming tectonic setting of sandstone-type uranium deposits in the southern margin of Junggar Basin
——Insights from U-Pb ages and Hf isotopes of detrital zircons

GENG Yingying¹⁾, LIU Zhangyue^{1, 2)}, HE Zhongbo¹⁾, HUANG Shaohua¹⁾,
GUO Qiang¹⁾, XU Qiang¹⁾, SONG Jiye¹⁾

1) *Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing, 100029;*

2) *State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing, 100083*

Abstract: Junggar basin is one of the most important basins producing multi-energy mineral, and Toutunhe area in the southern Junggar basin is the prospect section of the sandstone-type uranium ore prospecting. In this paper, based on the field investigation, LA-ICP-MS U-Pb dating and Hf isotope analysis of detrital zircons from the ore-bearing target layer of the sandstone-type uranium deposit in the southern Junggar basin have been carried out and the zircon U-Pb age spectrum, Hf isotope and model age were established. By comparing with the age of magmatic activity and combining with the paleocurrent data, we further analysis the provenance of the strata and the uranium source in sandstone-type uranium deposits. Four sandstone samples from the Jurassic and the Lower Cretaceous were collected for detrital zircon U-Pb dating. The analysis result shows that the detrital zircon U-Pb ages were divided into four peak age groups: 140~180 Ma, 240 ~ 320 Ma, 340~420 Ma, 440~480 Ma, and the age is evenly distributed within the 210~480 Ma range; The provenance of the Lower Jurassic strata with sandstone-type uranium mineralization was derived from the north Tianshan area; The materials from central—south Tianshan area began to increase and dominate in Middle Jurassic strata. After that, the provenance began to change to the

north Tianshan again since the late Middle Jurassic. The provenance of Early Cretaceous strata was mostly from the North Tianshan, and a small amount from the Bogda Mountains. The uranium source of sandstone-type uranium deposits in the southern margin of the Junggar basin should be related to the Paleozoic acidic magmatism in Tianshan area, and its mineralization should have occurred in a relatively stable environment.

Keywords: southern Junggar basin; sandstone-type uranium deposit; uranium source; detrital zircon U-Pb dating; Hf isotope

Acknowledgements: This study is supported by advanced research project of National Defense (No. 3210402) and National Science Foundation of China (No. 41902084).

First author: GENG Yingying, female, born in 1981, Master`s Degree, engineer, mainly engaged in metallogenic regularity and prediction of sandstone-type uranium deposits; Email: gyy928@163.com

Manuscript received on: 2019-05-28; Accepted on: 2020-02-08; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2020.02.010

《地质论评》对新赐稿件的形式审查要点

(1)前言节应当交代清楚本文所研究对象的历史、现状、存在问题及本文的创新之处,点出本文的重要意义。

(2)结论节,指出通过本文研究获得的新材料或新认识。

(3)参考文献我刊用著者-年制,文中提到的文献要一一列于文献表中,列于文献表中的文献一定要是正文(含图或表)中提到的。为方便专家审查和编辑,我刊要求送审稿必须用著者-年制。

(4)可以,也可以不,参照我刊其他一般要求(见"推荐文献"栏下)。如:终稿修改及提供材料要求,图件修改要求,英文摘要格式要求。还可以参见 地质论评最新文章样式. PDF。

(5)最后,但很重要,若是 word 格式的文稿,为了审稿专家和编辑阅读、批注方便,请将图、表依次插入文中出现处,但请不要分栏、分区(不要用图文框)(出现大片空白没有关系);可以插入行号(在"页面布局"菜单下)。还请注意插入图件的分辨率不要太高,不要超过 600 dpi,太大的文件,可能给审稿专家带来下载作者原稿或上传批注稿困难,耽误审稿。

(6)本刊声明:作者应对所投稿件拥有无可争议的著作权。作者应保证稿件没有一稿多投;投稿我刊之前未投给任何其他期刊(包括非汉语期刊),或虽曾投给其他期刊(包括非汉语期刊),但已被明确拒绝刊用。投稿我刊起的 90 日内,不要再投给任何其他期刊(包括非汉语期刊),除非收到我刊拒稿信息。作者必须保证我刊的首发权;在我刊刊出之

前(我刊自收到您的稿件到正式发表,一般需要 6~10 个月;需在更短的时间内见刊的文章,请与编辑部联系;重大发现类文章,可投我刊《窥斑速报》专栏,3 个月内即可见刊)不得以任何文种在任何国家或地区以任何形式发表(但可以在学术交流会口头交流并可向学术交流会提供不超过 2000 字的摘要;或者,事关国计民生的重大地质问题,急需告知广大民众,如地质灾害防控等,也可以且应当尽早在其他媒体公开)。稿件一旦被本刊录用,作者即将论文整体及附属论文的图、表等可许可使用的著作权——包括但不限于复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权和上述权利的许可使用权转交本刊。许可期限为论文著作权的法定保护期为限,许可地域范围为全世界。作者依著作权法行使上述权利,或向第三方转让上述权利时,不得损害本刊利益(例如,汇编入其他论文集时,可以去掉本刊的刊头、书眉等,并可作文字、图件和版式等修改,但必须注明曾在本刊刊出,并注明刊载的卷、期、页码和责任编辑等信息)。

(7)为适应我国信息化建设,扩大本刊及作者知识信息交流渠道,本刊已被国内外多家、多文种文献索引、文摘、全文数据库和出版网站收录,作者著作权使用费与本刊稿酬将在我刊刊出时一次性给付。如作者不同意文章被第三方摘录、索引,或不同意被网刊收录、传播,请在来稿时声明。

Editorial Department: Key points of formal examination for new manuscripts to *Geological Review*

附表 1 准噶尔盆地南缘头屯河地区侏罗系-白垩系砂岩中碎屑锆石 U-Pb 同位素分析结果

Attached Table 1 The analysis data of U-Pb isotope of detrital zircons from sandstones of the Jurassic and Cretaceous in Toutunhe area, southern margin of the Junggar Basin																	
点号	元素含量 (×10 ⁻⁶)				同位素比值						n(²³² Th)/ n(²³⁸ U)	年龄 Age(Ma)					
	Pb*	²³² Th	²³⁸ U	Pb _c	n(²⁰⁷ Pb)/ n(²⁰⁶ Pb)		n(²⁰⁷ Pb)/ n(²³⁵ U)		n(²⁰⁶ Pb)/ n(²³⁸ U)			n(²⁰⁷ Pb)/ n(²⁰⁶ Pb)		n(²⁰⁷ Pb)/ n(²³⁵ U)		n(²⁰⁶ Pb)/ n(²³⁸ U)	
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ		测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ
Zr15-1: E87°12'09.31"N43°39'39.02"; 下侏罗统八道湾组 (J ₁ b) 灰白色漂白粗砾岩																	
1	10.6	64.3	101	57.3	0.0616	0.0027	0.4562	0.0197	0.0543	0.0009	0.5517	661	96	382	14	341	6
2	20	149	199	37.8	0.0559	0.0019	0.4119	0.0142	0.0536	0.0007	0.6529	456	78	350	10	337	4
4	19.1	169	182	81.2	0.0579	0.0023	0.3886	0.0161	0.0488	0.0006	0.7715	524	85	333	12	307	4
5	28.3	239	251	115	0.0545	0.0021	0.4037	0.016	0.0537	0.0008	0.8546	391	83	344	12	337	5
7	20.9	149	232	108	0.0574	0.0019	0.3737	0.0117	0.0476	0.0006	0.5711	506	79	322	9	300	4
8	40.2	270	608	149	0.058	0.0017	0.3228	0.0096	0.0403	0.0005	0.3896	532	63	284	7	255	3
9	11.53	63.6	97	75.7	0.0562	0.0027	0.4744	0.0215	0.0622	0.001	0.553	457	106	394	15	389	6
12	23.1	236	187	98.9	0.0593	0.0021	0.4009	0.0151	0.0488	0.0007	1.1002	589	76	342	11	307	4
13	21.5	207	223	0	0.051	0.002	0.3501	0.015	0.0494	0.0009	0.8426	243	91	305	11	311	5
14	18.6	123	250	61.4	0.0562	0.0021	0.3476	0.0127	0.0453	0.0006	0.4299	461	85	303	10	285	4
15	12.8	114	114	81.9	0.0557	0.0026	0.3689	0.0174	0.0483	0.0006	0.852	439	104	319	13	304	4
16	26.2	152	395	0	0.0572	0.0016	0.362	0.0104	0.0458	0.0006	0.336	498	61	314	8	289	4
17	25.9	103	207	31.4	0.0572	0.0015	0.6266	0.0172	0.0795	0.0011	0.4349	498	57	494	11	493	7
18	6.06	35.4	60.2	71.2	0.053	0.0037	0.369	0.0229	0.051	0.0011	0.4916	332	159	319	17	321	7
19	7.88	80.8	76.7	22	0.0529	0.0034	0.342	0.0201	0.0471	0.0009	0.9182	328	144	299	15	297	5
20	15.3	121	171	7.02	0.0529	0.002	0.3733	0.0154	0.0509	0.0008	0.6087	324	87	322	11	320	5
21	41.6	315	492	4.31	0.0535	0.0015	0.3725	0.011	0.0503	0.0006	0.55	350	61	321	8	316	4
22	22.2	213	149	44.8	0.0567	0.0025	0.4264	0.0204	0.0542	0.001	1.2296	480	94	361	15	340	6
23	19.1	192	182	40	0.054	0.0021	0.3765	0.0163	0.0505	0.0008	0.9294	372	89	324	12	318	5
24	3.11	27.8	24.1	43.8	0.0509	0.0061	0.3216	0.0294	0.0493	0.0014	0.9965	239	261	283	23	310	9
25	14.1	65.8	103	56.7	0.059	0.0024	0.6184	0.0268	0.0758	0.0011	0.554	569	89	489	17	471	6
27	34.5	265	398	22.5	0.0532	0.0014	0.3727	0.0105	0.0509	0.0006	0.5566	345	61	322	8	320	4
28	4.77	33.7	73.9	19.8	0.0533	0.0039	0.2872	0.0186	0.0402	0.0008	0.3882	343	168	256	15	254	5
29	26.4	207	261	165	0.0539	0.0021	0.364	0.014	0.0492	0.0006	0.6809	365	87	315	10	310	4
30	9.39	60.7	112	50.3	0.0614	0.0034	0.3753	0.0203	0.0445	0.0007	0.458	654	120	324	15	281	4
31	6.52	23.6	59.7	17.4	0.0573	0.0028	0.5591	0.0277	0.0711	0.0011	0.3371	506	109	451	18	443	7
32	10.06	89.7	102	18.6	0.0519	0.003	0.3563	0.0193	0.0502	0.0008	0.751	280	131	309	14	315	5

点号	元素含量 (×10 ⁻⁶)				同位素比值						$n(^{232}\text{Th})/n(^{238}\text{U})$	年龄 Age(Ma)					
	Pb*	²³² Th	²³⁸ U	Pb _c	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$	
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ		测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ
33	24.2	351	264	65.5	0.0588	0.0028	0.2919	0.0129	0.0364	0.0005	1.1205	567	102	260	10	231	3
34	63.9	611	674	93.7	0.0534	0.0012	0.3573	0.0084	0.0486	0.0005	0.7735	346	50	310	6	306	3
35	35.9	361	323	100	0.0547	0.0018	0.3804	0.0123	0.0508	0.0007	0.9371	398	77	327	9	320	4
37	22.1	208	179	166	0.0515	0.0027	0.3502	0.0182	0.0494	0.0008	0.9828	265	119	305	14	311	5
38	35.2	368	322	80.2	0.0525	0.0014	0.3512	0.0099	0.0486	0.0006	0.9835	306	61	306	7	306	4
39	37	397	331	60.1	0.0553	0.0018	0.3601	0.012	0.0473	0.0006	0.8442	433	74	312	9	298	4
40	18.9	167	175	37	0.0554	0.0022	0.4172	0.0178	0.0545	0.0008	0.8038	428	92	354	13	342	5
41	2.11	20.3	25.8	0	0.0565	0.0067	0.3249	0.0371	0.0458	0.0014	0.661	472	265	286	28	288	9
42	8.56	96.8	117	0	0.0563	0.0031	0.3073	0.0172	0.0395	0.0007	0.6985	465	122	272	13	250	4
43	20.6	252	220	155	0.0563	0.0025	0.2952	0.0138	0.0378	0.0006	0.9679	465	100	263	11	239	4
44	9.81	49.6	83.6	13.6	0.0555	0.0033	0.5517	0.0311	0.0726	0.0012	0.4943	432	133	446	20	452	7
45	6.12	58.5	58.1	53.8	0.0538	0.0041	0.3384	0.0242	0.047	0.0011	0.8618	365	170	296	18	296	7
46	25.4	202	264	39.1	0.0537	0.0017	0.3961	0.0118	0.0539	0.0008	0.6347	367	73	339	9	339	5
47	12.85	144	201	36.1	0.053	0.0025	0.2555	0.0114	0.0353	0.0005	0.6127	328	107	231	9	224	3
48	19.5	161	206	4.7	0.0535	0.0016	0.3833	0.0112	0.0526	0.0007	0.6742	350	69	329	8	331	4
49	35.1	296	316	93.1	0.0633	0.002	0.4604	0.0141	0.0529	0.0006	0.801	720	67	385	10	332	4
50	22.4	157	156	0	0.0562	0.0018	0.5722	0.0192	0.0744	0.0012	0.8573	461	70	459	12	463	7
51	17.6	182	273	19.8	0.0509	0.0027	0.2752	0.0142	0.0395	0.0005	0.5647	235	122	247	11	249	3
52	31	246	282	15.4	0.0587	0.0021	0.4654	0.0168	0.0575	0.0007	0.7456	554	78	388	12	361	4
53	36.1	174	454	60.1	0.0555	0.0015	0.405	0.0111	0.0529	0.0007	0.3265	435	64	345	8	332	4
54	4.59	17.8	50	77.2	0.0624	0.0046	0.3855	0.0261	0.0453	0.0008	0.3048	687	159	331	19	285	5
55	25.3	185	291	47.1	0.0509	0.0015	0.3612	0.0116	0.0513	0.0007	0.5427	235	69	313	9	323	4
56	13.9	154	179	87.4	0.0527	0.0033	0.2762	0.0159	0.0386	0.0006	0.7311	317	143	248	13	244	4

Zr15-2: E87°12'22.58"N43°42'32.15"; 中侏罗统西山窑组 (J₂x) 灰色含砾粗砂岩

1	17.1	125.2	129.6	16.9	0.0541	0.0025	0.4748	0.0218	0.064	0.001	0.794	376	71	394	15	400	6
3	15.5	121.7	224.5	23.8	0.0527	0.0023	0.3327	0.0152	0.0455	0.0008	0.4489	317	98	292	12	287	5
4	10.3	57	83.6	3.4	0.0597	0.0028	0.5747	0.0261	0.0702	0.0009	0.5624	594	106	461	17	437	6
5	21.6	90.2	223	14	0.0566	0.0015	0.5359	0.016	0.0686	0.0011	0.3393	476	94	436	11	427	7
6	3	35.7	39.9	4.5	0.0637	0.0049	0.3134	0.0186	0.0382	0.0008	0.7646	731	164	277	14	242	5
7	38.9	326.1	364.3	25.5	0.0526	0.0016	0.4176	0.0128	0.0575	0.0007	0.6544	322	67	354	9	361	4
8	52.6	302.4	416.3	21.2	0.055	0.0012	0.5688	0.0129	0.0746	0.0009	0.6249	413	48	457	8	464	6

点号	元素含量 (×10 ⁻⁶)				同位素比值						$n(^{232}\text{Th})/n(^{238}\text{U})$	年龄 Age(Ma)					
	Pb*	²³² Th	²³⁸ U	Pb _c	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$	
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ		测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ
9	13	111	122.4	20.5	0.0577	0.0025	0.4314	0.0176	0.0549	0.0009	0.4782	517	94	364	12	345	5
10	5.6	30.6	48.4	8.7	0.0544	0.0034	0.5036	0.0291	0.0686	0.0013	0.4826	387	143	414	20	428	8
11	11.2	91.9	78.4	11	0.0558	0.0031	0.5217	0.0273	0.0686	0.0013	0.9059	456	124	426	18	428	8
13	47.1	382.2	416.1	15	0.0544	0.0014	0.432	0.011	0.0572	0.0006	0.7815	387	57	365	8	359	4
14	5.4	35.2	53.5	21.3	0.0577	0.0037	0.4638	0.0268	0.0592	0.0011	0.545	520	141	387	19	371	7
15	29.9	132.5	248.6	43.4	0.0657	0.0025	0.7065	0.0335	0.0765	0.0011	0.4334	798	77	543	20	475	7
17	10.4	78	95.6	20.8	0.0532	0.0026	0.4199	0.02	0.0587	0.0014	0.6895	345	105	356	14	368	8
18	29.2	150.5	259.4	0.1	0.0598	0.0016	0.6144	0.0181	0.0741	0.001	0.4858	594	25	486	11	461	6
19	16.1	122.7	133.9	11.9	0.0603	0.0025	0.5522	0.0245	0.0663	0.0011	0.8537	615	89	446	16	414	6
20	18.3	165.3	175.9	0	0.055	0.0019	0.4341	0.0157	0.0571	0.0009	0.7522	413	71	366	11	358	5
21	14.2	100.2	174.9	2.5	0.0566	0.0023	0.4206	0.0172	0.0543	0.0008	0.4664	476	89	356	12	341	5
22	23.4	17.3	304.3	21.2	0.058	0.0016	0.5696	0.0167	0.0711	0.0008	0.0486	528	63	458	11	443	5
23	19.2	127	221.1	39.9	0.0578	0.0024	0.4516	0.0202	0.0566	0.0009	0.4496	520	91	378	14	355	5
24	20.8	113.9	201.6	1	0.0559	0.0017	0.5256	0.0167	0.0679	0.0009	0.4859	450	64	429	11	424	5
26	22.5	154.5	168	0	0.0608	0.0017	0.5966	0.0184	0.0707	0.0008	0.7986	632	66	475	12	440	5
27	69.3	263.8	722.1	11.6	0.0556	0.001	0.5565	0.0111	0.0721	0.0009	0.3098	435	39	449	7	449	5
28	21.1	164.5	159.8	14.2	0.0588	0.0021	0.5392	0.0185	0.0668	0.0009	0.8545	561	80	438	12	417	6
29	33.2	144.7	312.6	50.3	0.0625	0.0016	0.5879	0.0152	0.0686	0.001	0.3802	700	56	470	10	428	6
30	8.8	96.1	112	0	0.0569	0.003	0.3419	0.0173	0.0439	0.0007	0.735	487	117	299	13	277	4
31	14.4	89.2	111.1	50.6	0.0636	0.0023	0.5865	0.0203	0.0674	0.0009	0.6698	728	275	469	13	420	6
32	15.9	93.9	143.6	21.4	0.059	0.0025	0.544	0.024	0.0671	0.0011	0.5946	569	93	441	16	419	7
33	47.5	150.5	547.8	9.9	0.0554	0.0011	0.529	0.0125	0.0689	0.0009	0.2336	428	42	431	8	430	5
34	14.8	97.5	122.1	26	0.0559	0.0021	0.5205	0.0193	0.0679	0.0009	0.6342	456	83	425	13	424	6
35	4.8	34.7	65.6	24.4	0.0583	0.004	0.3424	0.0228	0.0433	0.0007	0.4529	543	150	299	17	273	5
36	32.2	173.3	334.2	11.1	0.0562	0.0019	0.496	0.0168	0.0646	0.0008	0.4714	461	108	409	11	403	5
37	27	145.8	250.9	8.6	0.0557	0.0015	0.5245	0.0158	0.068	0.0009	0.4923	439	56	428	11	424	5
38	39.2	241.9	484	0	0.054	0.0014	0.4085	0.0114	0.0549	0.0006	0.4368	369	59	348	8	345	4
39	42.9	123	498.4	35.6	0.0591	0.0012	0.5216	0.0123	0.0639	0.0008	0.1718	572	46	426	8	399	5
40	14	101.8	178.5	19.7	0.0525	0.0021	0.3478	0.0137	0.0485	0.0007	0.4849	306	89	303	10	305	4
41	20	208	329.1	0	0.0532	0.0018	0.2806	0.0104	0.0384	0.0006	0.5149	339	80	251	8	243	4
42	15.6	107.6	133	1.3	0.0584	0.0028	0.5262	0.0256	0.0658	0.001	0.6806	543	110	429	17	411	6

点号	元素含量 (×10 ⁻⁶)				同位素比值						$n(^{232}\text{Th})/n(^{238}\text{U})$	年龄 Age(Ma)					
	Pb*	²³² Th	²³⁸ U	Pb _c	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$	
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ		测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ
43	46.4	372.5	425.8	1.2	0.0549	0.0014	0.4388	0.012	0.0579	0.0007	0.7464	409	64	369	8	363	4
44	39.8	270.7	314.1	14.6	0.057	0.0014	0.5463	0.0146	0.0695	0.0008	0.7629	500	56	443	10	433	5
45	24.5	158.1	225.9	27	0.0541	0.0019	0.4628	0.0176	0.0622	0.0011	0.6169	376	76	386	12	389	7
46	29.4	118.1	277.5	18.6	0.0577	0.0016	0.5902	0.0176	0.0741	0.0009	0.3482	520	66	471	11	461	5
47	8.5	63.8	87.1	1	0.0545	0.0023	0.4345	0.0188	0.0579	0.0009	0.6138	394	96	366	13	363	6
48	14.8	137.6	161.3	24	0.0531	0.0021	0.369	0.0154	0.0506	0.0009	0.7205	345	95	319	11	318	5
49	15.6	88.2	119.5	2	0.0569	0.0022	0.5937	0.0224	0.076	0.001	0.6064	487	52	473	14	472	6
50	3.2	17.8	27.3	0	0.0574	0.0045	0.5495	0.038	0.072	0.0015	0.5332	506	176	445	25	448	9
51	63.6	515.4	351.7	27.2	0.057	0.0014	0.6109	0.0167	0.0776	0.0011	1.2346	500	56	484	11	482	7
52	7.3	44.9	58.1	0	0.058	0.0032	0.5419	0.0282	0.0681	0.0011	0.6448	528	94	440	19	425	7
53	18	106.8	202.3	20.2	0.0551	0.0018	0.4408	0.0147	0.0582	0.0008	0.4526	417	79	371	10	365	5
54	25.4	199.5	363.2	19.7	0.055	0.0015	0.3545	0.0111	0.0468	0.0009	0.442	409	63	308	8	295	5
55	40.8	284.5	440.4	25.8	0.0564	0.0014	0.4503	0.0129	0.0574	0.0007	0.4709	465	56	378	9	360	4
56	7.6	76.8	81.2	16.9	0.0532	0.0029	0.3466	0.0162	0.0483	0.0008	0.7863	345	122	302	12	304	5
57	27.3	236.2	263.9	19.1	0.0544	0.0017	0.4301	0.0135	0.0576	0.0008	0.7259	387	69	363	10	361	5
58	12.1	89.5	86.8	22.2	0.0559	0.0024	0.5259	0.0218	0.0686	0.001	0.8607	456	96	429	14	428	6
59	10.1	64.1	82.1	11.6	0.0549	0.0029	0.5299	0.0283	0.0703	0.0012	0.7631	406	119	432	19	438	7
60	18.5	141	225.7	19.3	0.0534	0.0018	0.3731	0.0126	0.0509	0.0008	0.5242	346	44	322	9	320	5
61	21.5	69.6	237	13.7	0.0573	0.0015	0.5333	0.0143	0.0676	0.0008	0.2258	506	53	434	9	421	5
62	11.1	80.4	86.7	6.8	0.0577	0.0029	0.5337	0.0267	0.0671	0.001	0.7682	517	83	434	18	418	6
63	12.8	76.9	143.4	26	0.0548	0.0028	0.4527	0.022	0.0606	0.001	0.389	467	119	379	15	379	6
64	8.9	94.6	119.9	39.9	0.0519	0.003	0.2844	0.0162	0.0403	0.0007	0.6753	280	135	254	13	255	4
66	44.7	479	276.2	14.1	0.0563	0.0019	0.4582	0.0149	0.0591	0.0007	1.4271	465	76	383	10	370	4
67	36.1	217.7	296.4	19.2	0.0561	0.0013	0.5391	0.0129	0.07	0.001	0.6029	457	52	438	8	436	6
Zr15-3: E87°12'55.46"N43°45'05.57"; 中侏罗统头屯河组 (J ₂ t) 褐黄色氧化砂岩																	
2	9.12	70.8	102	18.7	0.06	0.0027	0.4277	0.0195	0.0521	0.0008	0.5747	606	96	362	14	327	5
3	8.33	60.6	94.5	21.2	0.058	0.003	0.4001	0.0197	0.0512	0.0009	0.5384	532	115	342	14	322	5
4	14	135	188	12.3	0.0515	0.0022	0.3055	0.0127	0.0434	0.0006	0.6134	261	101	271	10	274	4
5	5.72	34.3	77.9	16	0.0537	0.0028	0.3539	0.0183	0.0481	0.0008	0.3739	367	119	308	14	303	5
6	33.7	102	435	58.1	0.0613	0.0019	0.4584	0.0142	0.0543	0.0007	0.1988	650	63	383	10	341	4
7	7.93	61.4	83.9	20.6	0.0564	0.0028	0.4007	0.019	0.0523	0.0008	0.6135	478	103	342	14	329	5

点号	元素含量 (×10 ⁻⁶)				同位素比值						n(²³² Th)/ n(²³⁸ U)	年龄 Age(Ma)					
	Pb*	²³² Th	²³⁸ U	Pb _c	n(²⁰⁷ Pb)/ n(²⁰⁶ Pb)		n(²⁰⁷ Pb)/ n(²³⁵ U)		n(²⁰⁶ Pb)/ n(²³⁸ U)			n(²⁰⁷ Pb)/ n(²⁰⁶ Pb)		n(²⁰⁷ Pb)/ n(²³⁵ U)		n(²⁰⁶ Pb)/ n(²³⁸ U)	
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ		测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ
8	30.5	191	306	8.92	0.0556	0.0015	0.4813	0.0143	0.0627	0.0009	0.5373	439	61	399	10	392	5
9	17	148	171	13.8	0.0562	0.0023	0.4127	0.0171	0.0534	0.0007	0.7228	461	93	351	12	335	4
10	36.4	256	447	5.81	0.0524	0.0015	0.3796	0.0115	0.0524	0.0007	0.4825	302	65	327	8	329	4
11	9.81	77.4	111	13.5	0.0539	0.0024	0.3895	0.0178	0.0528	0.0009	0.5174	365	100	334	13	331	5
12	18.9	127	198	7.65	0.0559	0.0021	0.4425	0.0163	0.0581	0.0008	0.5368	456	85	372	11	364	5
13	48	649	375	3.43	0.0535	0.0014	0.3565	0.0093	0.0484	0.0006	1.466	350	53	310	7	305	4
15	20.7	123	237	9.92	0.056	0.0017	0.4423	0.0139	0.0573	0.0008	0.4387	450	64	372	10	359	5
16	8.45	78.5	99.9	16.2	0.0535	0.0028	0.3397	0.0176	0.0462	0.0006	0.6725	350	116	297	13	291	4
17	5.9	53.1	58		0.0557	0.004	0.4054	0.03	0.0532	0.0009	0.7973	443	161	346	22	334	6
18	4.86	32.2	72.3	16.5	0.0573	0.0035	0.3362	0.0208	0.0427	0.0007	0.3711	502	135	294	16	269	4
19	15.17	105	197	16.7	0.0584	0.0025	0.3895	0.0187	0.0481	0.0008	0.4623	543	90	334	14	303	5
20	4.14	16.7	42.3		0.0591	0.0036	0.5572	0.0347	0.0678	0.0013	0.3369	569	133	450	23	423	8
21	11.49	60.2	104	10.9	0.0583	0.0024	0.5614	0.0242	0.0697	0.0011	0.4987	539	86	452	16	434	6
23	10.52	58.3	90.9		0.056	0.0025	0.5409	0.0249	0.0701	0.001	0.544	454	98	439	16	437	6
24	2.93	10.2	40.8	10.5	0.0644	0.0044	0.4487	0.0285	0.0526	0.0011	0.2152	754	142	376	20	331	7
25	23.9	95.3	203	17.8	0.059	0.0015	0.6427	0.017	0.0791	0.0012	0.3882	569	49	504	11	491	7
26	23.2	92.3	200	12.1	0.0566	0.0016	0.6131	0.0183	0.0783	0.001	0.3933	476	63	485	12	486	6
27	6.16	31	57.7	9.54	0.0589	0.0039	0.5382	0.035	0.0669	0.0012	0.4322	561	146	437	23	418	7
28	20.7	224	231	8.57	0.0543	0.0018	0.3339	0.0111	0.0448	0.0006	0.793	389	74	293	8	283	4
29	31.3	160	406	7.04	0.0533	0.0014	0.4169	0.012	0.0567	0.0008	0.3267	343	92	354	9	355	5
30	36.8	191	252	11.1	0.0571	0.0015	0.6326	0.0168	0.0805	0.0012	0.6293	494	57	498	10	499	7
31	12.24	48.4	95.8	12.4	0.055	0.0022	0.5842	0.0281	0.0768	0.002	0.396	413	91	467	18	477	12
32	16.1	117	196	16.6	0.0536	0.0018	0.3573	0.0132	0.0482	0.0007	0.4796	354	78	310	10	303	5
34	14.9	90.3	220	14.9	0.0569	0.0021	0.3725	0.0138	0.0476	0.0007	0.353	487	80	322	10	300	4
35	4.5	47.1	44.5	14	0.0616	0.004	0.3867	0.0232	0.0468	0.001	0.9017	661	138	332	17	295	6
36	33.7	184	361	10.6	0.0567	0.0013	0.472	0.0115	0.0602	0.0008	0.4391	480	48	393	8	377	5
37	8.6	77.7	112	1.51	0.0525	0.0025	0.3201	0.015	0.0447	0.0008	0.5974	309	111	282	12	282	5
39	26.2	350	491	21	0.0572	0.0024	0.236	0.0096	0.0303	0.0006	0.4483	498	60	215	8	193	4
40	28.9	154	320	11.8	0.0546	0.0017	0.4764	0.0157	0.0634	0.001	0.4212	394	70	396	11	396	6
42	12.99	82.2	112	10.4	0.0556	0.0021	0.5275	0.0213	0.0691	0.0011	0.6101	435	85	430	14	431	7
43	15.1	116	185	5.96	0.0539	0.0019	0.3725	0.0131	0.0502	0.0006	0.5364	369	84	321	10	316	4

点号	元素含量 (×10 ⁻⁶)				同位素比值						$n(^{232}\text{Th})/n(^{238}\text{U})$	年龄 Age(Ma)					
	Pb*	²³² Th	²³⁸ U	Pb _c	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$	
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ		测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ
44	8.66	103	104	3.63	0.0543	0.0033	0.3265	0.0185	0.0442	0.0007	0.8596	383	140	287	14	279	5
45	6.03	26.7	57.8	20.6	0.0641	0.0037	0.5914	0.0338	0.0676	0.0012	0.3993	744	122	472	22	422	7
46	25.9	116	176	20	0.0563	0.0019	0.6705	0.0223	0.0868	0.0014	0.5483	465	105	521	14	536	8
48	4.76	23.4	45.9		0.0592	0.0034	0.5626	0.0338	0.0701	0.0013	0.4335	572	126	453	22	437	8
50	4.61	49.2	54.6	16.1	0.0579	0.0041	0.3366	0.0222	0.0432	0.0009	0.7755	528	156	295	17	273	5
51	20.2	120	223	8.67	0.0547	0.0015	0.4273	0.0117	0.0567	0.0007	0.4513	467	61	361	8	356	4
52	16.6	151	255		0.0563	0.0018	0.3048	0.011	0.0389	0.0005	0.3947	465	105	270	9	246	3
53	34.9	329	479	30.2	0.0613	0.0018	0.3218	0.0081	0.0387	0.0006	0.5773	650	69	283	6	245	4
54	31.6	289	378	4.41	0.051	0.0012	0.331	0.0081	0.047	0.0006	0.6392	243	56	290	6	296	4
55	20	138	175	7.4	0.0573	0.0016	0.487	0.0129	0.0617	0.0006	0.6638	502	59	403	9	386	4
56	6.68	51.1	87	6.7	0.0562	0.0024	0.3663	0.0163	0.0471	0.0007	0.4989	461	103	317	12	297	4
57	26.6	168	271		0.054	0.0015	0.4402	0.0133	0.0588	0.0006	0.5225	372	65	370	9	368	3
58	13.6	133	175	8.56	0.0518	0.0016	0.3164	0.0112	0.044	0.0005	0.6214	276	69	279	9	278	3
59	5.05	62.4	62.4	3.02	0.052	0.0032	0.2787	0.0165	0.0391	0.0006	0.7941	287	139	250	13	247	4
60	17	176	189	15.2	0.054	0.0016	0.347	0.0105	0.0466	0.0005	0.7681	369	67	302	8	294	3
61	18.2	263	215	13.5	0.0563	0.0022	0.2947	0.0114	0.0381	0.0005	1.0339	461	87	262	9	241	3
62	12.57	108	170	8.59	0.0521	0.0016	0.3146	0.0108	0.0436	0.0005	0.5235	300	72	278	8	275	3
63	23.2	149	357	14.7	0.0554	0.0014	0.3449	0.0093	0.045	0.0006	0.3445	432	54	301	7	284	4
64	27.5	271	321	23.5	0.0559	0.0016	0.3713	0.011	0.0483	0.0007	0.5903	456	63	321	8	304	4
65	7.38	56.4	115	3.93	0.0544	0.002	0.3132	0.0117	0.0419	0.0005	0.4269	387	88	277	9	265	3
68	17.38	111	302	11.9	0.0535	0.0012	0.3002	0.007	0.0405	0.0004	0.3243	354	84	267	5	256	3
69	27.5	167	494	18.4	0.0533	0.0014	0.2964	0.008	0.0401	0.0004	0.2915	343	59	264	6	254	3
70	15.4	160	146	6.26	0.053	0.0018	0.363	0.0124	0.0497	0.0006	0.941	328	75	314	9	312	4
71	17.5	152	160	6.85	0.0569	0.0017	0.4339	0.0126	0.0551	0.0006	0.7517	487	65	366	9	346	4
72	10.32	57.3	111	12.9	0.054	0.002	0.4445	0.016	0.0598	0.0007	0.4169	369	81	373	11	374	4
73	9.49	61.7	95	0.29	0.0587	0.0024	0.4792	0.0191	0.0592	0.0007	0.5611	554	89	398	13	371	5
74	23.7	193	337	0.25	0.0532	0.0015	0.3313	0.0104	0.0447	0.0005	0.4977	339	97	291	8	282	3
75	19	186	148	3.28	0.0558	0.0019	0.4411	0.0146	0.0571	0.0006	1.0424	456	76	371	10	358	4
76	3.26	32.7	38.1	9.82	0.0537	0.0036	0.3242	0.0203	0.0446	0.001	0.7268	367	154	285	16	281	6
77	17.8	220	166	7.63	0.0536	0.0016	0.3366	0.0099	0.0454	0.0005	1.1144	354	69	295	8	286	3
78	27	194	236		0.0547	0.0013	0.4849	0.0124	0.0639	0.0007	0.6498	398	56	401	8	400	4

点号	元素含量 (×10 ⁻⁶)				同位素比值						$n(^{232}\text{Th})/n(^{238}\text{U})$	年龄 Age(Ma)					
	Pb*	²³² Th	²³⁸ U	Pb _c	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$	
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ		测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ
79	33.4	334	464	13.9	0.0538	0.0013	0.3151	0.0076	0.0423	0.0004	0.5639	361	54	278	6	267	2
80	11.91	100	159		0.0519	0.0021	0.3325	0.0133	0.0465	0.0005	0.5341	280	93	292	10	293	3
Zk2801: 下白垩统清水河组 (K ₁ q) 灰色—灰绿色中粗粒砂岩																	
1	19.1	196	228	0	0.0551	0.002	0.3633	0.0143	0.0481	0.0008	0.7827	413	81	315	11	303	5
2	30.3	297	405	10.7	0.0538	0.0017	0.3468	0.0117	0.0466	0.0007	0.6543	365	68	302	9	294	4
3	25	215	322	20.3	0.0548	0.0017	0.3675	0.0123	0.0485	0.0007	0.6068	406	70	318	9	305	4
4	17.8	172	217	0	0.054	0.0021	0.3679	0.0154	0.0492	0.0008	0.7031	372	87	318	11	309	5
5	13.1	225	358	15.3	0.0502	0.0024	0.1562	0.0071	0.0228	0.0003	0.5882	206	111	147	6	145	2
6	10.6	99.5	116	4.1	0.0578	0.0028	0.4072	0.02	0.0515	0.0009	0.8106	520	112	347	14	324	6
7	36.2	120	849	36.1	0.0529	0.0014	0.3116	0.009	0.0425	0.0006	0.1134	328	25	275	7	268	4
8	18.2	201	280	0	0.0539	0.0021	0.3089	0.0121	0.0418	0.0006	0.5996	365	87	273	9	264	4
9	12	204	262	18.1	0.0488	0.0026	0.1775	0.0086	0.0267	0.0005	0.7201	200	124	166	7	170	3
10	3.9	24.6	63.5	12.6	0.0524	0.0033	0.3334	0.021	0.0467	0.0009	0.3653	306	144	292	16	294	5
11	7.4	49.5	138	0	0.0532	0.0032	0.3327	0.0209	0.0452	0.0008	0.3405	339	142	292	16	285	5
12	13.7	42.1	59.6	0	0.0671	0.0027	1.3369	0.0568	0.1443	0.0023	0.6563	843	85	862	25	869	13
13	22.4	165	335	6	0.0523	0.0017	0.3546	0.0129	0.049	0.0008	0.4699	298	76	308	10	308	5
14	17.5	130	227	0.3	0.0507	0.0019	0.3478	0.0127	0.0499	0.0008	0.568	233	85	303	10	314	5
15	20.9	157	275	17.6	0.053	0.0024	0.3678	0.0161	0.0504	0.0006	0.532	328	100	318	12	317	4
16	13.9	73.7	122	9.7	0.058	0.0021	0.6001	0.0234	0.0751	0.0011	0.5519	528	75	477	15	467	6
17	11.5	92.6	151	24.8	0.0511	0.0022	0.3331	0.0138	0.0475	0.0006	0.5286	243	100	292	11	299	4
18	3.2	50.7	85.8	8.3	0.0515	0.0048	0.1611	0.0127	0.0239	0.0005	0.5358	265	213	152	11	152	3
19	19.2	187	246	9.6	0.0507	0.0017	0.3396	0.0127	0.0482	0.0007	0.6862	228	80	297	10	303	4
20	11.7	77.4	161	23.5	0.0534	0.0025	0.3652	0.0157	0.0504	0.0009	0.4309	346	106	316	12	317	5
21	59.5	406	538	0	0.055	0.0013	0.5095	0.0125	0.0669	0.0009	0.6867	413	52	418	8	418	5
22	12	94.7	170	19.8	0.0521	0.0021	0.3422	0.0141	0.0476	0.0008	0.5051	287	91	299	11	300	5
23	11.1	71.6	199	4.6	0.057	0.0026	0.3482	0.0159	0.0445	0.0007	0.301	500	102	303	12	281	4
24	6.8	52.1	116	0	0.0517	0.0027	0.329	0.0191	0.0455	0.0008	0.3981	333	120	289	15	287	5
25	17.8	170	132	0	0.0543	0.0021	0.4702	0.0188	0.0629	0.001	1.1902	383	82	391	13	393	6
26	27.5	257	262	31.7	0.0528	0.0025	0.3891	0.02	0.0531	0.0007	0.8974	317	114	334	15	334	4
27	9.8	105	139	0	0.0551	0.0024	0.3331	0.0148	0.0441	0.0007	0.6462	417	96	292	11	278	5
28	18.3	99.5	184	0	0.0559	0.0019	0.5243	0.0186	0.0678	0.0012	0.5078	456	76	428	12	423	7

点号	元素含量 (×10 ⁻⁶)				同位素比值						$n(^{232}\text{Th})/n(^{238}\text{U})$	年龄 Age(Ma)					
	Pb*	²³² Th	²³⁸ U	Pb _c	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$	
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ		测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ
29	20.3	119	250	27.3	0.0536	0.0017	0.4376	0.0145	0.0591	0.0008	0.4493	354	75	369	10	370	5
30	2.9	17	42.2	25.6	0.0529	0.0044	0.318	0.0219	0.0452	0.0012	0.372	324	191	280	17	285	7
31	12.7	237	302	42.4	0.0489	0.0028	0.1639	0.0098	0.0242	0.0004	0.7668	143	130	154	9	154	3
32	11.2	90.4	182	22.7	0.0496	0.0025	0.2945	0.015	0.0433	0.0007	0.4794	176	123	262	12	273	4
33	15.7	301	296	8.8	0.0512	0.0024	0.1886	0.0091	0.0271	0.0004	0.9586	256	77	175	8	173	3
34	25	133	281	19	0.0547	0.0016	0.4901	0.0157	0.0646	0.0009	0.4427	398	65	405	11	404	5
35	25.6	219	335	33.8	0.053	0.0017	0.3583	0.0121	0.049	0.0007	0.6042	332	106	311	9	309	4
36	20.9	151	256	18.5	0.0526	0.0024	0.3809	0.017	0.0526	0.0008	0.5489	309	99	328	13	331	5
37	19.8	190	291	24.9	0.0547	0.0025	0.3157	0.015	0.0419	0.0007	0.6045	398	99	279	12	265	4
38	29.7	189	287	0	0.0555	0.0013	0.5121	0.0145	0.0668	0.0011	0.61	432	54	420	10	417	7
39	17.7	145	265	0	0.0557	0.0021	0.3652	0.0147	0.0476	0.0007	0.4803	443	85	316	11	300	4
40	20.2	168	285	24.4	0.0542	0.002	0.3625	0.015	0.0486	0.0009	0.542	376	79	314	11	306	6
41	24.6	517	524	3	0.0503	0.0019	0.1766	0.0076	0.0253	0.0004	0.8757	206	92	165	7	161	3
42	24.5	158	270	11.8	0.053	0.0018	0.4574	0.0182	0.0622	0.001	0.5102	328	75	382	13	389	6
43	25.5	112	201	38.6	0.0581	0.0018	0.6627	0.0213	0.0831	0.0012	0.5003	600	73	516	13	515	7
44	8.8	124	217	22.2	0.0499	0.0035	0.1772	0.0125	0.0261	0.0005	0.5113	187	165	166	11	166	3
45	17.3	104	137	29.2	0.0568	0.0021	0.5843	0.0233	0.0749	0.0011	0.6757	483	85	467	15	465	7
46	14.7	79.2	147	33.9	0.0545	0.0019	0.5098	0.019	0.068	0.001	0.4753	391	84	418	13	424	6
47	7.8	83.9	87.8	0	0.0523	0.0032	0.3546	0.0225	0.049	0.0009	0.849	298	139	308	17	308	6
48	8.6	83.7	131	16	0.0529	0.003	0.2899	0.0162	0.0405	0.0007	0.5457	324	130	258	13	256	4
49	10.3	85.6	141	21.7	0.0534	0.0027	0.3477	0.0177	0.0473	0.0007	0.5379	346	112	303	13	298	4
50	19.7	214	240	0	0.051	0.0018	0.3333	0.0126	0.0479	0.0007	0.7694	243	77	292	10	302	4
51	6.4	56.7	73.7	2	0.0551	0.0034	0.4103	0.0249	0.055	0.001	0.7084	413	106	349	18	345	6
52	6.1	85.6	180	7.3	0.0497	0.0029	0.1821	0.0116	0.0263	0.0005	0.4116	189	140	170	10	168	3
53	34.6	309	552	1.1	0.0471	0.0013	0.2935	0.0087	0.0452	0.0007	0.5155	58	63	261	7	285	4
54	7.8	72.7	100	10.9	0.055	0.003	0.3844	0.0221	0.0506	0.001	0.6247	409	120	330	16	318	6
55	21.9	160	317	11.1	0.0524	0.0021	0.375	0.0154	0.052	0.0008	0.4574	302	93	323	11	327	5
56	11	93.7	147	2.5	0.0549	0.0025	0.3823	0.0177	0.0511	0.0009	0.5636	409	102	329	13	321	5
57	8.3	63.5	140	11.3	0.0491	0.0025	0.3057	0.0143	0.0461	0.0007	0.3957	154	153	271	11	290	5
58	13.4	167	125	2.3	0.0577	0.0029	0.389	0.019	0.0494	0.0008	1.2059	520	79	334	14	311	5
59	12.6	106	122	5	0.0534	0.0022	0.4421	0.0185	0.0601	0.0008	0.7875	346	94	372	13	376	5

点号	元素含量 (×10 ⁻⁶)				同位素比值						$n(^{232}\text{Th})/n(^{238}\text{U})$	年龄 Age(Ma)					
	Pb*	²³² Th	²³⁸ U	Pb _c	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$	
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ		测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ
60	14.2	121	163	0	0.0546	0.0023	0.4156	0.0171	0.0552	0.0008	0.6734	394	93	353	12	346	5
61	6.5	36.7	153	4.2	0.0578	0.0032	0.323	0.0188	0.0414	0.0008	0.2276	524	120	284	14	262	5
62	15.1	105	171	6	0.0547	0.002	0.469	0.0173	0.0623	0.0008	0.5271	467	81	391	12	389	5
63	3.3	22.9	55.5	9.4	0.0585	0.0042	0.3528	0.0254	0.0448	0.001	0.368	550	157	307	19	282	6
64	20.2	407	469	2	0.051	0.0022	0.1771	0.0074	0.0255	0.0004	0.7531	243	69	166	6	162	2
65	20.9	161	174	0	0.0583	0.0019	0.5542	0.0194	0.069	0.0011	0.8324	543	66	448	13	430	7
66	8.8	49.3	97.9	5	0.0588	0.0029	0.5251	0.0258	0.0654	0.0011	0.4413	567	105	429	17	408	7
67	13.1	111	208	5	0.0551	0.0022	0.3494	0.0143	0.0464	0.0007	0.4544	417	91	304	11	292	4
68	16.9	101	162	0	0.0592	0.002	0.5861	0.0235	0.0714	0.0012	0.5588	572	81	468	15	444	7
69	13.7	122	167	0	0.0554	0.0023	0.3853	0.0169	0.0506	0.0009	0.6067	428	94	331	12	318	6
70	7.5	74.7	80.2	0	0.0593	0.0035	0.425	0.0261	0.0526	0.0009	0.8347	576	130	360	19	330	6
71	8.6	89.2	121	6.4	0.0558	0.0031	0.3366	0.0191	0.0439	0.0007	0.6449	456	124	295	14	277	4
72	6.2	60.7	88.3	0	0.0601	0.0035	0.372	0.0231	0.045	0.001	0.6109	606	126	321	17	284	6
73	15.7	126	235	3.6	0.057	0.0027	0.373	0.0171	0.0475	0.0006	0.4953	500	106	322	13	299	4
74	25.6	156	433	5	0.0541	0.0016	0.3573	0.0114	0.0477	0.0006	0.3305	376	67	310	9	301	4
75	33.8	888	591	0	0.0493	0.0017	0.1652	0.0063	0.0242	0.0004	1.3702	161	81	155	5	154	2
76	13.1	120	179	4.1	0.0552	0.0029	0.3472	0.018	0.0456	0.0005	0.613	420	117	303	14	287	3
77	9.1	60.1	136	1.7	0.0539	0.0025	0.3857	0.0187	0.0519	0.0008	0.4135	369	108	331	14	326	5
78	14.2	98	160	9.3	0.0617	0.0038	0.4635	0.0275	0.0546	0.0009	0.5736	663	133	387	19	343	6
79	6.2	48.7	102	0	0.0533	0.0029	0.3294	0.0189	0.0449	0.0008	0.4499	339	126	289	14	283	5
80	3.7	47.7	63.1	0	0.0546	0.0043	0.2646	0.0194	0.0354	0.0009	0.7481	394	176	238	16	224	6
81	14.4	373	212	7.1	0.0516	0.0036	0.1831	0.0121	0.026	0.0005	1.6224	333	161	171	10	165	3
82	5.6	38.9	99.3	0	0.0599	0.0035	0.369	0.0221	0.0449	0.0008	0.3685	598	121	319	16	283	5
83	23.4	281	658	0	0.0527	0.0018	0.2053	0.0077	0.028	0.0004	0.4014	322	78	190	7	178	2
84	26.7	200	433	0	0.0533	0.0018	0.3503	0.0129	0.0476	0.0007	0.4272	343	80	305	10	300	4
85	47.6	348	396	0	0.0567	0.0016	0.5576	0.0169	0.071	0.0009	0.8176	480	59	450	11	442	5
86	132	249	239	3	0.0985	0.0021	4.0062	0.0955	0.2946	0.0038	0.9426	1595	34	1635	19	1664	19
87	6.8	47.8	111	3.1	0.056	0.0028	0.3865	0.0206	0.0506	0.001	0.3784	454	114	332	15	318	6

注：Pb*和 Pb_c 分别表示放射性成因 Pb 和普通 Pb；划横线数据为谐和度低，不列入作图数据。

附表 2 准噶尔盆地南缘头屯河地区侏罗系-白垩系砂岩中碎屑锆石 Hf 同位素分析结果												
Attached Table 2 The analysis data of Hf isotope compositions in detrital zircon from sandstone from sandstones of the Jurassic and Cretaceous in Toutunhe area, southern margin of the Junggar Basin												
样品	t(Ma)	$n(^{176}\text{Yb})/n(^{177}\text{Hf})$	2σ	$n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$	2σ	$n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM1}}(\text{Hf})$	$T_{\text{DM2}}(\text{Hf-mafic})$	$T_{\text{DM2}}(\text{CC})$	$T_{\text{DM2}}(\text{Hf-felsic})$
ZR15-1: E87°12'09.31"N43°39'39.02"; 下侏罗统八道湾组 (J ₁ b) 灰白色漂白粗砾岩												
02	337	0.0276	0.0011	0.001099	0.000043367	0.282743	0.000027	6.15	723	1207	950	831
04	307	0.0120	0.0002	0.000524	0.000007963	0.282691	0.000026	3.79	784	1400	1077	928
05	337	0.0280	0.0001	0.001155	0.000006927	0.282691	0.000025	4.31	798	1374	1067	926
14	285	0.0375	0.0002	0.001345	0.000004782	0.282967	0.000029	12.93	407	558	477	440
16	289	0.0294	0.0001	0.001074	0.000003285	0.282949	0.000021	12.42	430	607	513	470
17	493	0.0097	0.0001	0.000428	0.000004505	0.282330	0.000024	-4.92	1282	2304	1768	1522
23	318	0.0176	0.0002	0.000715	0.000009550	0.282717	0.000026	4.91	752	1306	1014	879
28	254	0.0278	0.0005	0.001120	0.000020694	0.282942	0.000032	11.41	441	674	550	493
32	315	0.0182	0.0001	0.000704	0.000003297	0.282815	0.000026	8.31	615	997	796	703
40	342	0.0851	0.0023	0.003093	0.000057448	0.282887	0.000033	10.90	548	781	651	591
41	288	0.0343	0.0001	0.001345	0.000007062	0.282951	0.000034	12.42	431	607	513	469
45	296	0.0341	0.0004	0.001342	0.000015786	0.282828	0.000026	8.24	606	990	785	691
47	224	0.0179	0.0001	0.000756	0.000005242	0.282836	0.000022	7.08	586	1047	803	691
51	249	0.0368	0.0003	0.001521	0.000015063	0.282617	0.000028	-0.27	912	1727	1290	1089
55	323	0.0153	0.0001	0.000727	0.000003505	0.282536	0.000023	-1.41	1006	1878	1418	1206
ZR15-2: E87°12'22.58"N43°42'32.15"; 中侏罗统西山窑组 (J ₂ x) 灰色含砾粗砂岩												
01	400	0.0217	0.0007	0.000808	0.000024750	0.282534	0.000027	0.18	1010	1787	1376	1188
07	361	0.0210	0.0010	0.000913	0.000034039	0.282558	0.000022	0.13	980	1764	1349	1158
08	464	0.0192	0.0002	0.000871	0.000007205	0.282158	0.000021	-11.78	1536	2896	2177	1846
15	475	0.0137	0.0004	0.000623	0.000015565	0.282114	0.000021	-13.03	1588	3014	2263	1918
22	443	0.0227	0.0002	0.001054	0.000004534	0.282889	0.000026	13.60	515	605	557	535
23	355	0.0058	0.0000	0.000194	0.000001301	0.282383	0.000018	-6.00	1201	2309	1731	1465
24	424	0.0197	0.0001	0.000768	0.000004300	0.282500	0.000022	-0.52	1057	1864	1438	1242
27	449	0.0355	0.0019	0.001320	0.000069796	0.282351	0.000027	-5.39	1282	2317	1765	1510
28	417	0.0357	0.0004	0.001312	0.000014057	0.282516	0.000026	-0.24	1050	1835	1416	1223
29	428	0.0262	0.0012	0.000934	0.000040674	0.282472	0.000023	-1.48	1101	1954	1502	1295
35	273	0.0314	0.0006	0.001371	0.000024647	0.282906	0.000025	10.51	495	769	623	555
36	403	0.0265	0.0008	0.001034	0.000028302	0.282508	0.000025	-0.72	1053	1870	1436	1236
37	424	0.0252	0.0001	0.000978	0.000004845	0.282503	0.000017	-0.47	1059	1860	1436	1240
39	399	0.0132	0.0005	0.000520	0.000016503	0.282726	0.000022	7.04	735	1169	941	836
40	305	0.0325	0.0009	0.001429	0.000033415	0.282848	0.000026	9.13	579	916	735	652
44	433	0.0500	0.0017	0.001791	0.000054600	0.282461	0.000027	-1.97	1142	2002	1538	1324
45	389	0.0569	0.0036	0.002392	0.000146716	0.282623	0.000027	2.67	925	1555	1210	1052
47	363	0.0119	0.0001	0.000569	0.000002987	0.282629	0.000027	2.80	872	1526	1182	1024
49	472	0.0165	0.0002	0.000652	0.000007400	0.282581	0.000025	3.44	941	1542	1226	1080

样品	t(Ma)	$n(^{176}\text{Yb})/n(^{177}\text{Hf})$	2σ	$n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$	2σ	$n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM1}}(\text{Hf})$	$T_{\text{DM2}}(\text{Hf-mafic})$	$T_{\text{DM2}}(\text{CC})$	$T_{\text{DM2}}(\text{Hf-felsic})$
50	448	0.0403	0.0010	0.001566	0.000036776	0.282345	0.000031	-5.71	1301	2346	1785	1527
54	295	0.0318	0.0004	0.001146	0.000018858	0.282983	0.000024	13.74	382	491	433	407
58	428	0.0195	0.0003	0.000742	0.000011910	0.282734	0.000024	7.86	729	1114	911	818
59	438	0.0137	0.0001	0.000557	0.000003627	0.282563	0.000022	2.09	964	1640	1285	1121
63	379	0.0275	0.0002	0.001061	0.000008954	0.282554	0.000028	0.35	990	1757	1350	1162
66	370	0.0606	0.0018	0.002605	0.000075578	0.282715	0.000029	5.51	794	1288	1017	892

ZR15-3: E87°12'55.46"N43°45'05.57"; 中侏罗统头屯河组（J₂t）褐黄色氧化砂岩

24	331	0.0329	0.0006	0.001682	0.000026795	0.282949	0.000022	13.18	437	566	497	465
25	491	0.0135	0.0002	0.000485	0.000006404	0.282260	0.000021	-7.47	1381	2530	1927	1649
27	418	0.0142	0.0004	0.000666	0.000017974	0.282869	0.000021	12.46	538	691	610	573
29	355	0.0499	0.0013	0.001562	0.000029965	0.282788	0.000028	8.02	668	1051	845	750
30	499	0.0128	0.0001	0.000452	0.000005835	0.282212	0.000018	-8.96	1445	2668	2026	1731
32	303	0.0182	0.0001	0.000738	0.000007506	0.282748	0.000024	5.67	710	1228	954	829
33	372	0.0224	0.0004	0.000875	0.000008869	0.282860	0.000021	11.10	553	783	662	606
42	431	0.0293	0.0003	0.001154	0.000003669	0.282874	0.000024	12.77	538	672	601	568
43	316	0.0370	0.0005	0.001482	0.000023371	0.282791	0.000024	7.31	662	1088	860	755
45	422	0.0264	0.0002	0.001232	0.000013012	0.282869	0.000023	12.39	546	700	618	580
46	536	0.0315	0.0008	0.001583	0.000041633	0.282363	0.000029	-3.22	1275	2181	1694	1471
48	437	0.0140	0.0001	0.000620	0.000003008	0.282872	0.000024	12.98	533	657	592	562
50	273	0.0255	0.0001	0.001027	0.000000832	0.282840	0.000024	8.22	584	976	768	672
51	356	0.0271	0.0001	0.001111	0.000006775	0.282558	0.000022	0.00	985	1773	1354	1161
54	296	0.0329	0.0004	0.001416	0.000017319	0.282911	0.000021	11.17	488	725	598	540
55	386	0.0330	0.0004	0.001331	0.000020376	0.282806	0.000024	9.37	638	950	783	706
56	297	0.0293	0.0001	0.001348	0.000010945	0.282817	0.000028	7.85	622	1026	810	711
58	278	0.0139	0.0001	0.000560	0.000000797	0.282806	0.000021	7.19	626	1073	838	730
59	247	0.0117	0.0001	0.000466	0.000004315	0.282906	0.000026	10.12	483	787	628	554
61	241	0.0268	0.0005	0.001066	0.000017754	0.282777	0.000025	5.29	675	1220	930	797
62	275	0.0252	0.0008	0.001022	0.000035340	0.282666	0.000022	2.12	830	1529	1158	987
69	254	0.0253	0.0004	0.000983	0.000014343	0.282917	0.000023	10.54	474	753	605	537
70	312	0.0153	0.0001	0.000609	0.000004923	0.282743	0.000025	5.73	713	1228	957	833
71	346	0.0344	0.0002	0.001409	0.000006557	0.282615	0.000027	1.74	912	1611	1237	1065
73	371	0.0276	0.0001	0.001257	0.000005239	0.282910	0.000027	12.75	488	633	556	520
74	282	0.0178	0.0001	0.000725	0.000002780	0.282857	0.000021	9.09	555	904	720	636

Zk2801: 下白垩统清水河组（K₁q）灰色—灰绿色中粗粒砂岩

01	303	0.0192	0.0001	0.000794	0.000005931	0.282853	0.000029	9.36	563	894	719	639
02	294	0.0200	0.0003	0.000844	0.000012066	0.282869	0.000031	9.73	541	854	688	612
06	324	0.0234	0.0001	0.000961	0.000001168	0.282746	0.000031	6.01	716	1211	948	828
08	264	0.0255	0.0007	0.000972	0.000024726	0.282721	0.000028	3.83	752	1368	1041	891
11	285	0.0133	0.0002	0.000555	0.000005036	0.282937	0.000028	11.99	441	643	537	488

样品	t(Ma)	$n(^{176}\text{Yb})/n(^{177}\text{Hf})$	2 σ	$n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$	2 σ	$n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$	2 σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM1}}(\text{Hf})$	$T_{\text{DM2}}(\text{Hf-mafic})$	$T_{\text{DM2}}(\text{CC})$	$T_{\text{DM2}}(\text{Hf-felsic})$
12	869	0.0094	0.0001	0.000384	0.000001391	0.282262	0.000027	0.96	1374	2029	1686	1528
16	467	0.0201	0.0004	0.000816	0.000013126	0.282622	0.000029	4.71	888	1424	1141	1011
19	303	0.0284	0.0003	0.001099	0.000011020	0.282852	0.000031	9.27	569	902	725	644
20	317	0.0131	0.0000	0.000533	0.000001484	0.282967	0.000028	13.76	399	504	449	423
22	300	0.0321	0.0002	0.001296	0.000008259	0.282720	0.000029	4.49	760	1332	1027	887
27	278	0.0271	0.0014	0.001093	0.000052865	0.282949	0.000034	12.17	431	623	521	474
30	285	0.0193	0.0002	0.000774	0.000007939	0.282835	0.000033	8.34	588	974	770	677
34	404	0.0265	0.0003	0.001036	0.000016963	0.282660	0.000027	4.65	839	1387	1096	962
35	309	0.0336	0.0002	0.001146	0.000004305	0.282757	0.000033	6.04	704	1198	935	814
36	331	0.0300	0.0006	0.001144	0.000020784	0.282941	0.000032	12.99	443	584	509	475
39	300	0.0267	0.0002	0.001006	0.000003905	0.282832	0.000028	8.50	596	969	771	680
41	161	0.0349	0.0010	0.001339	0.000033135	0.282778	0.000028	3.59	678	1320	977	819
43	515	0.0248	0.0002	0.000877	0.000006488	0.282832	0.000029	13.17	593	694	641	616
44	166	0.0113	0.0000	0.000472	0.000001035	0.282542	0.000027	-4.54	990	2056	1497	1240
45	465	0.0208	0.0002	0.000813	0.000006879	0.282288	0.000026	-7.15	1354	2485	1887	1613
46	424	0.0279	0.0001	0.001029	0.000003128	0.282783	0.000030	9.43	666	970	808	734
48	256	0.0361	0.0009	0.001301	0.000023056	0.282862	0.000031	8.60	557	931	731	639
50	302	0.0596	0.0012	0.002333	0.000039005	0.282910	0.000028	11.05	503	740	610	551
51	345	0.0188	0.0003	0.000734	0.000009995	0.282902	0.000028	12.02	493	682	582	536
52	168	0.0745	0.0007	0.002387	0.000004778	0.282897	0.000034	7.83	523	941	712	607
56	321	0.0280	0.0005	0.001108	0.000023780	0.282688	0.000027	3.88	801	1401	1082	935
60	346	0.0110	0.0002	0.000460	0.000006797	0.282867	0.000031	10.88	538	785	656	596
62	389	0.0165	0.0003	0.000646	0.000012477	0.282848	0.000034	11.11	567	794	674	619
64	162	0.0306	0.0004	0.001197	0.000012815	0.282763	0.000030	3.11	697	1364	1008	845
69	318	0.0465	0.0005	0.001747	0.000011214	0.282886	0.000037	10.67	529	786	648	584