

· 专题研究 ·

Doi: 10.20086/j.cnki.yskw.2023.0601

以地质事件性质讨论华北克拉通古元古界典型地层时代

——以五台地区滹沱群为例

杜利林, 杨崇辉, 宋会侠, 刘平华, 任留东, 张文

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 从滹沱群底部四集庄组不同的分布区选择了1件正长花岗斑岩、1件似斑状二长花岗岩砾石及1件侵入于蒋村四集庄组的正长花岗斑岩, 进行了锆石U-Pb-Hf同位素分析。获得正长花岗斑岩和似斑状二长花岗岩砾石的锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄分别为 $2\ 507\pm14\text{ Ma}$ 和 $2\ 519\pm35\text{ Ma}$, 推断花岗岩砾石的物源可能为五台新太古代晚期峨口花岗岩和兰芝山花岗岩; 侵入于四集庄组的正长花岗斑岩锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2\ 157\pm15\text{ Ma}$, 结合四集庄组、五台地区高凡群火山岩年龄结果和华北克拉通 $2.2\sim2.0\text{ Ga}$ 地质事件的性质, 认为滹沱群底界可能为 $2.2\sim2.18\text{ Ga}$, 顶界时代约为 2.0 Ga , 其沉积对应一期强烈的陆内裂谷伸展过程。新太古代花岗岩砾石和古元古代花岗岩锆石Hf同位素结果指示, 五台地区新太古代早期出现明显的地壳生长, 新太古代晚期也存在地壳增长。

关键词: 五台地区; 滹沱群; 四集庄组; 锆石U-Pb-Hf同位素; 沉积时限

中图分类号: P588.12⁺1; P588.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)06-0767-21

Discussing the age of the typical Paleoproterozoic stratigraphy in the North China Craton based on geological events: A case study of the Hutuo Group in Wutai Mountains

DU Li-lin, YANG Chong-hui, SONG Hui-xia, LIU Ping-hua, REN Liu-dong and ZHANG Wen

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: From the different distribution areas of the Sijizhuang Formation at the bottom of the Hutuo Group, one sample of orthoclase granite-porphyry and one sample of porphyritic monzogranite gravels were selected, along with one sample of orthoclase granite-porphyry intruded into the Sijizhuang Formation in Jiangcun area. Zircon U-Pb-Hf isotope analysis was conducted. The weighted average ages of the orthoclase granite-porphyry and the porphyritic monzogranite gravel were determined to be $2\ 507\pm14\text{ Ma}$ and $2\ 519\pm35\text{ Ma}$, respectively, indicating that the sources of the granite gravels were likely the late Neoarchean Ekou granite and Lanzhishan granite. The zircon $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age of the orthoclase granite-porphyry intruded into the Sijizhuang Formation was determined to be $2\ 157\pm15\text{ Ma}$. Combining the ages of the Sijizhuang Formation and the Gaofan Group volcanic rocks in the Wutai area, and the geological events in the North China Craton from 2.2 to 2.0 Ga , it is inferred that the lower boundary of the Hutuo Group is likely to be 2.2 to 2.18 Ga , and its upper boundary age is approximately 2.0 Ga . The depo-

收稿日期: 2023-06-09; 接受日期: 2023-09-19; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20230209, DD20221649, DD20190003); 国家自然科学基金(42372237, 41772191, 41572175, 41972205, 41172171)

作者简介: 杜利林(1973-), 男, 研究员, 主要从事早前寒武纪地质研究, E-mail: dulilin7310@163.com。

sition process represents a period of intense intracontinental rift setting. The Hf isotope results of the Neoarchean granite gravel and the Paleoproterozoic granite zircons indicate that there was strong crustal growth in the early Neoarchean and crustal growth also existed in the late Neoarchean in the Wutai area.

Key words: Wutai area; the Hutuo Group; the Sijizhuang Formation; zircon U-Pb-Hf isotope; sedimentation time range

Fund support: Project of China Geological Survey(DD20230209, DD20221649, DD20190003); National Natural Science Foundation of China(42372237, 41772191, 41572175, 41972205, 41172171)

地层是地球演化过程中重要的地质信息载体,其时代的准确厘定或限定对建立标准地层剖面、探讨地球环境演变过程、追溯地质演化历史都具有重要意义。显生宙地层很多赋存有全球性可对比的化石记录,通过古生物化石、特殊沉积地层标志及火山(凝灰)岩定年,可以非常准确地限定地层时代并进行区域及全球性对比。但对于前寒武纪,尤其是缺少生物化石记录的早前寒武纪地层,其时代的确定主要依赖于其中可能存在的中酸性火山(凝灰)岩层定年(杨崇辉等,2015a; Du *et al.*, 2016a; Peng *et al.*, 2017, 2023);同时,利用沉积岩中碎屑锆石及地层与一些脉体的地质关系综合限定地层时代也越来越多地被广泛应用(王伟等,2009; 万渝生等,2010; 李怀坤等,2011)。然而,对于一些不发育火山岩的早前寒武纪沉积地层时代的准确限定仍存在较大的困难。已有研究资料表明,华北克拉通古元古代中期沉积盆地的形成过程与同期的岩浆事件在时代和构造性质上可能存在紧密的联系(杨崇辉等,2015a; Du *et al.*, 2016b)。本文通过对滹沱群四集庄组砾岩中花岗岩砾石和侵入四集庄组的花岗岩锆石的U-Pb-Hf研究,结合对华北古元古代中期地质事件性质的分析基础,试图从地质事件的角度探讨华北典型古元古代地层——滹沱群的沉积时限。

1 五台地区滹沱群时代研究现状

作为华北克拉通最典型的古元古界地层之一,五台地区滹沱群受到国内外学者的广泛关注(白瑾,1986; 伍家善等,1986, 2008; 王汝铮等,1997; 苗培森等,1999; Wilde *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2006; 杜利林等,2009, 2010, 2011, 2013, 2015; 万渝生等,2010; 郭进京等,2011; 孔凡凡等,2011; Liu *et al.*, 2011; Du *et al.*, 2015, 2017; She *et al.*, 2016; 陈威宇等,2018; Chen *et al.*, 2019; Ouyang *et al.*, 2020, 2023; Peng *et al.*, 2023)。但由于该套

地层总体以陆源碎屑沉积岩和碳酸盐岩为主,其中有限分布的火山岩主要为变质玄武岩(白瑾,1986; 伍家善等,1986, 2008; 杜利林等,2009, 2010; Du *et al.*, 2015),因此滹沱群的时代长期未能较为准确地限定。早期获得大石岭组黑云母石榴片岩中黑云母的K-Ar年龄为1 800 Ma,豆村亚群千枚岩、板岩Rb-Sr全岩等时线年龄为1 851 Ma,据此推测滹沱群上限时代大于1 900 Ma(白瑾,1986)。伍家善等(1986)在刘定寺的青石村组玄武岩中获得锆石U-Pb一致线上交点年龄为2 366+103/-94 Ma,首次为滹沱群下界提供了同位素年龄约束,并将滹沱群下限形成年龄限制在2 400~2 300 Ma。王汝铮等(1997)报道滹沱群青石村组与河边村组玄武岩单颗粒锆石U-Pb年龄分别为2 450±10 Ma和2 400±20 Ma。但由于早期U-Pb年代学研究缺少锆石成因研究的技术手段,同时由于滹沱群玄武岩受到陆壳物质的强烈混染,其年龄结果的解释还存在很多疑问(杜利林等,2010)。随着SHRIMP和LA-ICPMS原位分析技术的应用,配合锆石形态和内部结构的研究,滹沱群年代学研究积累了许多新的资料。Wilde等(2004)在青石村组中发现薄层的长英质凝灰岩,利用SHRIMP方法获得两组锆石年龄结果分别为2 180±5 Ma和2 087±9 Ma,并认为2 087±9 Ma代表了青石村组火山岩的时代。伍家善等(2008)在滹沱群底部四集庄组变质玄武岩中获得了2.5 Ga和2.1 Ga两组锆石年龄结果,认为前者代表了滹沱群的初始沉积时代,而后者为变质时代。杜利林等(2010)从五台县七图村南黄金山西坡滹沱群四集庄组玄武安山岩中获得年龄结果为2 140±14 Ma,限定滹沱群初始沉积时代为古元古代中期。之后,一些学者通过滹沱群不同亚群和层位碎屑锆石U-Pb年代学研究,进一步限定了该套地层的形成时代为2.2 Ga之后(杜利林等,2011, 2015; Liu *et al.*, 2011; Du *et al.*, 2017)。然而,陈威宇等(2018)根据四集庄组中不同层位碎屑岩中最年轻锆石的3个

年龄结果 $2\,440 \pm 40$ Ma、 $2\,400 \pm 23$ Ma 和 $2\,121 \pm 22$ Ma, 限定滹沱群四集庄组沉积的时限为 $2.4 \sim 2.1$ Ga。最近, Peng 等(2023)从滹沱群四集庄组获得长英质火山碎屑岩的锆石年龄为 $2\,121 \pm 10$ Ma, 再一次精确地限定滹沱群初始沉积时代为古元古代中期。

2 五台地区地质背景

五台地区作为华北早前寒武纪岩石出露的经典地区, 出露有新太古代五台群、新太古代 TTG 片麻岩和二长-钾质花岗片麻岩、古元古代滹沱群和同期花岗岩(图 1; 白瑾, 1986)。传统意义上的五台群被划分为石咀亚群、台怀亚群和高凡亚群。石咀亚群底部以变沉积岩为主, 其上主体为变质基性火山-沉积岩建造, 局部出现变质中酸性火山岩; 台怀亚群以变质中基性火山岩为主, 夹变质中酸性火山岩、沉积岩。石咀亚群和台怀亚群中发育条带状铁建造

(BIF), 是五台地区重要的铁矿赋矿层位, 变质程度分别为角闪岩相和绿片岩相。高凡亚群以底部稳定的石英岩(洪寺石英岩)为标志层, 主体岩石为变质碎屑沉积岩, 上部出现变质基性火山岩, 经历了(低)绿片岩相变质(白瑾, 1986; 田永清, 1991)。新太古代晚期的花岗岩主体为 TTG 质片麻岩, 少量的二长-钾质花岗片麻岩, 时代为 $2\,560 \sim 2\,513$ Ma, 与同期的变质基性火山岩组成典型的五台花岗-绿岩带, 推断形成于俯冲相关的构造环境中(Wang et al., 2004; Wilde et al., 2005)。近年来, 高凡亚群中碎屑锆石和火山凝灰岩年代学研究指示其可能形成于古元古代, 被从原五台群中分离出来命名为高凡群(万渝生等, 2010, 2022; Liu et al., 2016; Peng et al., 2017, 2023)。

滹沱群主体分布于五台山区南坡, 在北坡代县滩上到原平白石和繁峙中台等地有少量分布, 出露总面积约 $1\,700 \text{ km}^2$ (图 2; 白瑾, 1986; 田永清, 1991;

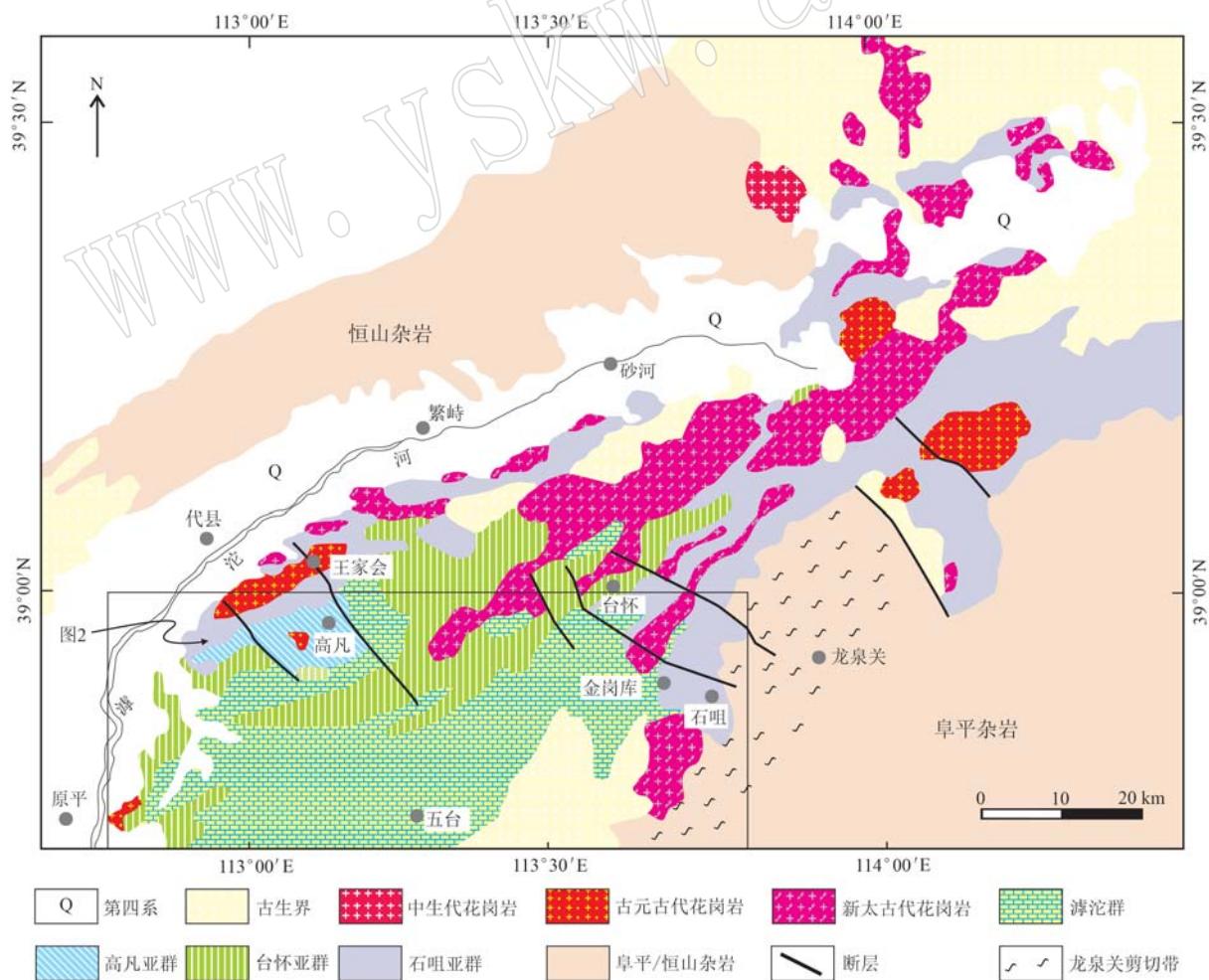


图 1 五台地区地质简图(Wilde et al., 2005)
Fig. 1 Geological sketch map of Wutai area (after Wilde et al., 2005)

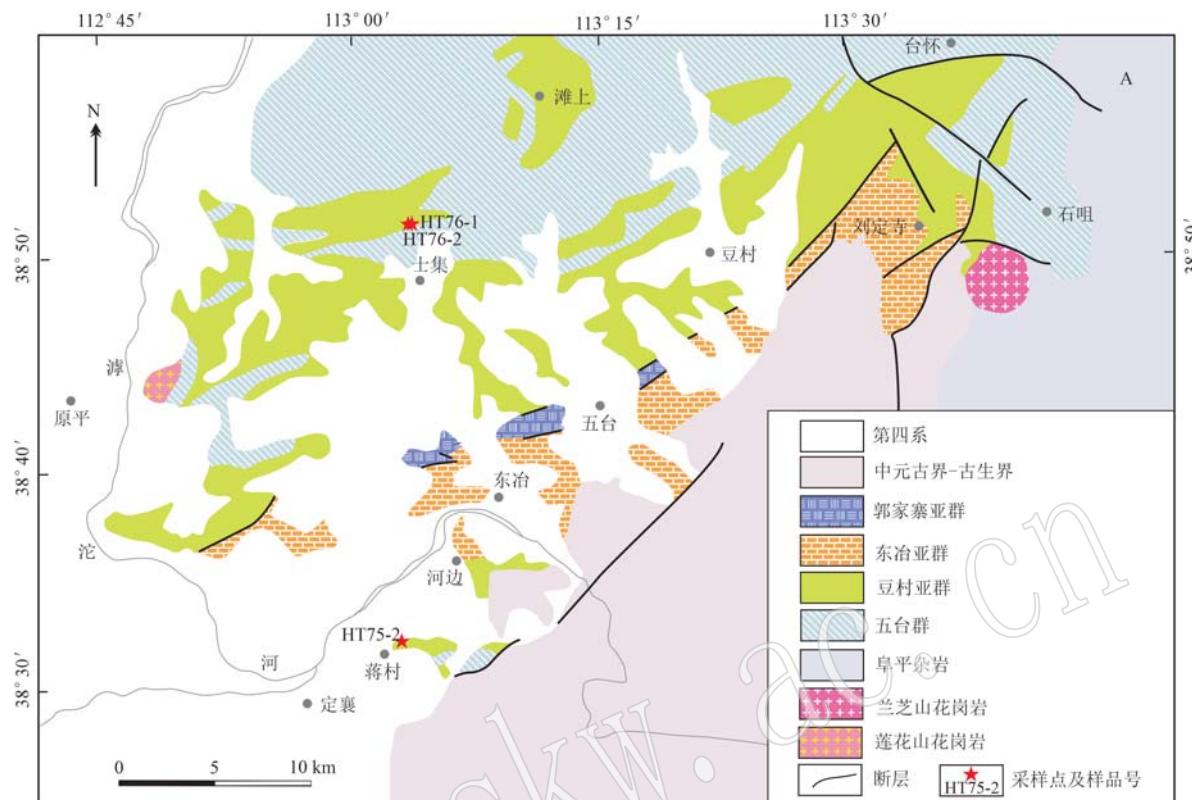


图2 五台地区滹沱群地质简图(伍家善等, 2008)

Fig. 2 Geological sketch map of the Hutuo Group in Wutai area (after Wu Jiashan et al., 2008)

苗培森等, 1999)。滹沱群不整合于新太古代五台群和同时代的片麻岩之上, 自下而上被划分为豆村、东冶和郭家寨3个亚群14个组, 由变质砾岩、石英岩、千枚岩、板岩、白云岩和大理岩并夹少量的变质玄武岩组成(图3; 白瑾, 1986)。宏观上, 滹沱群呈一个大型复式向斜, 向斜主轴走向60°, 向东仰起, 东西长90 km, 南北宽近40 km。向斜北翼以豆村亚群地层为主, 层序自北向南逐渐变新; 而向斜南翼主体为东冶亚群, 层序从南到北逐渐变新。褶皱南翼由于中元古界-古生界地层覆盖, 豆村亚群仅在定襄蒋村和河边村附近有少量出露(白瑾, 1986; 杜利林等, 2015)。郭家寨亚群明显不整合于已经褶皱变形的豆村和东冶亚群之上, 并且其沉积序列与下伏豆村和东冶亚群地层明显不同(白瑾, 1986; 苗培森等, 1999; 伍家善等, 2008; 杜利林等, 2011; Du et al., 2017)。因此, 一些研究者提出郭家寨亚群应从滹沱群中解体并独立命名为郭家寨群(伍家善等, 2008; 杜利林等, 2011; Du et al., 2017)。五台地区与滹沱群同期的古元古代花岗岩主要有王家会粉色相花岗岩(Wilde et al., 2005; 张许平等, 2016;

杜利林等, 2018)、大洼梁花岗岩(Wilde et al., 2005; 杜利林等, 2018)、莲花山花岗岩(杜利林等, 2018)、黄金山花岗斑岩(伍家善等, 2008; Du et al., 2013)、蒋村石英斑岩(杜利林等, 2015)和独峪花岗岩(白瑾, 1986)。最近, 有学者在五台杂岩东部石咀附近厘定出一套2.7~2.65 Ga的TTG质片麻岩, 但具体的分布范围还不十分清楚(Mao et al., 2023)。

3 四集庄组砾岩及样品地质特征

四集庄组作为滹沱群最底部的地层, 主体为变质砾岩, 上部有少量的石英岩, 顶部为砂质千枚岩(白瑾, 1986)。在土集村北(四集庄组命名地)的滹沱群与五台群界面附近, 四集庄组底部发育数十米厚的灰绿色杂砂岩与含砾杂砂岩。从碎屑物质组成看, 推测其来自近源的五台群(鸿门岩组与柏芝岩组), 很可能是裂谷初始拉张时的近源堆积。但并不是所有的四集庄组砾岩之下都发育这套杂砂岩, 其分布范围远小于四集庄组砾岩, 也从另一方面说明

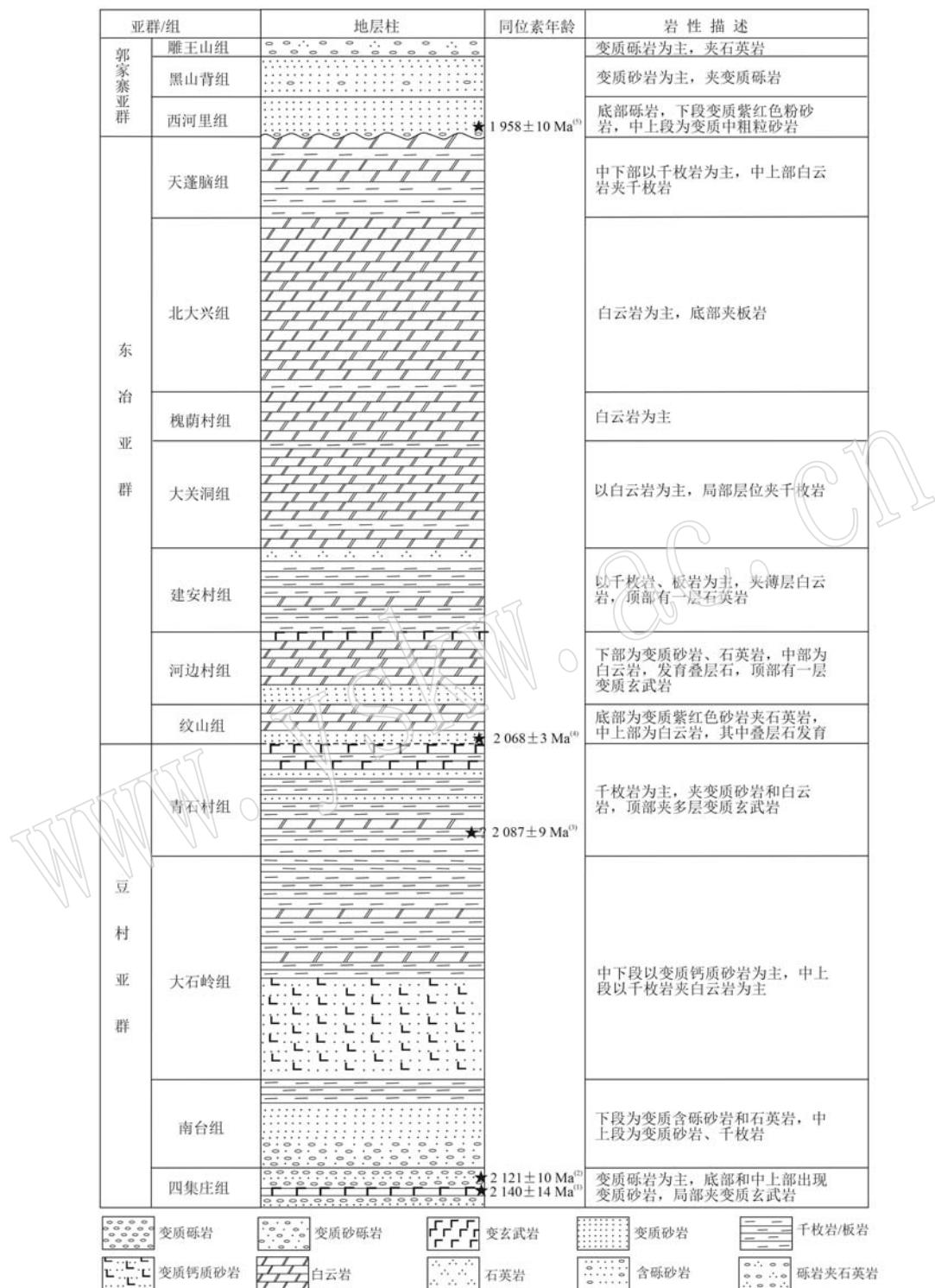


图3 五台地区滹沱群地层柱状简图(据白瑾, 1986; 苗培森等, 1999; 杜利林等, 2011)

Fig. 3 The Hutuo Group stratigraphic column in the Wutai Mountains area (after Bai Jin, 1986; Miao Peisen et al., 1999; Du Lilin et al., 2011)

1—变质玄武岩安山岩年龄(杜利林等, 2010); 2—火山碎屑岩年龄(Peng et al., 2023); 3—火山凝灰岩年龄(Wilde et al., 2004); 4—浅变质砂岩碎屑锆石峰值年龄(杜利林等, 2011); 5—变质砂岩中最年轻碎屑锆石年龄(杜利林等, 2011)

1—the age of metamorphic andesite (Du Lilin et al., 2010); 2—the age of pyroclastic rock (Peng et al., 2023); 3—the age of volcanic tuff (Wilde et al., 2004); 4—the peak age of detrital zircons from weakly metamorphic sandstone (Du Lilin et al., 2011); 5—the youngest age of detrital zircon in metamorphic sandstone (Du Lilin et al., 2011)

了其初始拉张的特征,而其上大规模的典型四集庄组砾岩则是裂谷进一步发展的结果(杜利林等,2011)。砾岩中砾石成分受下伏五台群和片麻岩的岩性控制,主体以石英岩砾石为主,含量可达70%,与花岗质片麻岩接触的不整合面附近,出现大量的花岗岩砾石(白瑾,1986; Zhang et al., 2006; 伍家善等,2008; 杜利林等,2013)。较为特殊的是,在砾岩中可见变质变形的条带状铁矿砾石,反映在砾岩沉积之前应有更早期的变质变形事件存在(杜利林等,2013)。砾岩中砾石间的胶结物以下伏五台群和/或片麻岩剥蚀的变质基性火山质和砂质胶结为主。砾石总体磨圆度好,但由于后期构造作用,通常发生强烈变形并呈定向排列。从沉积特征分析,四集庄组中砾岩和砂岩是冲积扇环境下形成的沉积岩组合(苗培森等,1999);而一些研究者根据砾岩中局部砾石出现冰川擦痕和砂岩中的落石构造,提出四集庄组砾岩为一套冰积砾岩(陈威宇等,2018; Chen et al., 2019; Peng et al., 2023)。

四集庄组砾岩中花岗岩砾石主体为TTG质片麻岩,已有的研究结果皆表明其来自于下伏的五台片麻岩(Zhang et al., 2006; 伍家善等,2008; 杜利林等,2013; Peng et al., 2023)。杜利林等(2015)在蒋村四集庄组砾岩中发现石英斑岩砾石,并获得2件石英斑岩基岩样品的锆石U-Pb年龄分别为 $2\ 166\pm17\text{ Ma}$ 和 $2\ 138\pm17\text{ Ma}$,初步限定蒋村地区碎屑沉积岩时代应小于2 138 Ma。

本次工作选择滹沱群底部四集庄组砾岩进行了较详细的野外地质调查,根据砾石成分特征和滹沱群底部地层与围岩的地质关系,选择了2件花岗岩砾石和1件侵入四集庄组的花岗斑岩砾石进行了锆石U-Pb-Hf同位素研究。样品采集的位置分别为四集庄组的命名地土集村北和蒋村东(图2)。土集村北出露的厚层砾岩中,主体为石英岩砾石,少量的条带状铁矿和变火山岩砾石(图4a)。野外工作中发现,四集庄组砾岩中出现少见的正长花岗斑岩和似斑状二长花岗岩砾石(图4b、4c)。正长花岗斑岩(HT76-1)砾石呈浅肉红色,块状构造、斑状结构,斑晶含量25%~30%,主要为钾长石,有少量石英斑晶。似斑状二长花岗岩(HT76-2)砾石磨圆度较好,呈浅灰色,块状构造,似斑状结构,斑晶为钾长石,含量5%~10%,基质为细粒斜长石、石英、钾长石和角闪石。蒋村地区的四集庄组砾岩和砂岩呈互层状,砾岩中砾石以石英岩为主,同时可见条带状铁矿和石

英斑岩砾石(图4d; 杜利林等,2015)。砂岩中斜层理和交错层理发育(图4e),可以指示地层层序上下关系。在局部露头上,可见正长花岗斑岩侵入于蒋村四集庄组变质砂岩中(图4f)。正长花岗斑岩中,斑晶为钾长石、镁铁矿物和石英(图4g、4h)。本次锆石U-Pb年龄样品中,HT76-1和HT76-2采自五台县东冶镇土集村北沟内($38^{\circ}51'04.38''\text{N}$, $113^{\circ}05'34.34''\text{E}$)的四集庄组砾岩中,HT75-2样品采自定襄县蒋村镇东山坡($38^{\circ}32'19.68''\text{N}$, $113^{\circ}03'11.99''\text{E}$)侵入于四集庄组砂岩的正长花岗斑岩中。

4 锆石U-Pb-Hf同位素分析方法及结果

锆石单矿物分选在河北廊坊宇能(宇恒)实验室完成。锆石阴极发光图像在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成。原位锆石U-Pb同位素和微量元素在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,测试流程见 Diwu 等(2011, 2014)。分析仪器为美国 Agilent 公司生产的 Agilent7500a 型 ICPMS, 配备德国 MicroLas 公司生产的 Geolas 200M 型 193 nm ArF 准分子激光器。采用 He 作为剥蚀物质的载体。激光束斑直径为 32 μm , 频率为 6 Hz, 采用美国国家标准技术研究院的人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 进行仪器最佳化,使仪器达到最大的信号强度($^{238}\text{U}>2\ 000\ \text{cps}/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)和最小的氧化物产率($\text{ThO}/\text{Th}<1\%$)。激光采样方式为单点剥蚀。每个分析点的气体背景采集时间为 20 s,信号采集时间为 40 s。数据处理采用 GLITTER 程序(Version 4.0), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ($^{235}\text{U}=^{238}\text{U}/137.88$)和 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 的比值采用标准锆石 91500 为外标进行校正,其推荐的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 $1\ 062.4\pm0.4\text{ Ma}$ (Wiedenbeck et al., 1995)。元素含量校正以 ^{29}Si 作内标,采用 NIST SRM610 作外标。锆石谐和图采用 Isoplot 程序(Ludwig, 2001)完成。

原位微区锆石 Hf 同位素比值在武汉上谱分析科技有限责任公司的激光剥蚀多接收杯等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)上完成,详细分析方法可见 Hu 等(2012)。分析仪器为德国 Thermo Fisher Scientific 公司 Neptune Plus 型 MC-ICP-MS, 配备德国 Coherent 公司 Geolas HD 激光剥蚀系统。分析过程同时配备了信号平滑装置以提高信号稳定性和同位素比值测试精密度(Hu et al., 2015)。载气使用 He,并在剥蚀池之后引入少量氮气以提高 Hf 元素灵敏度(Hu et al.,

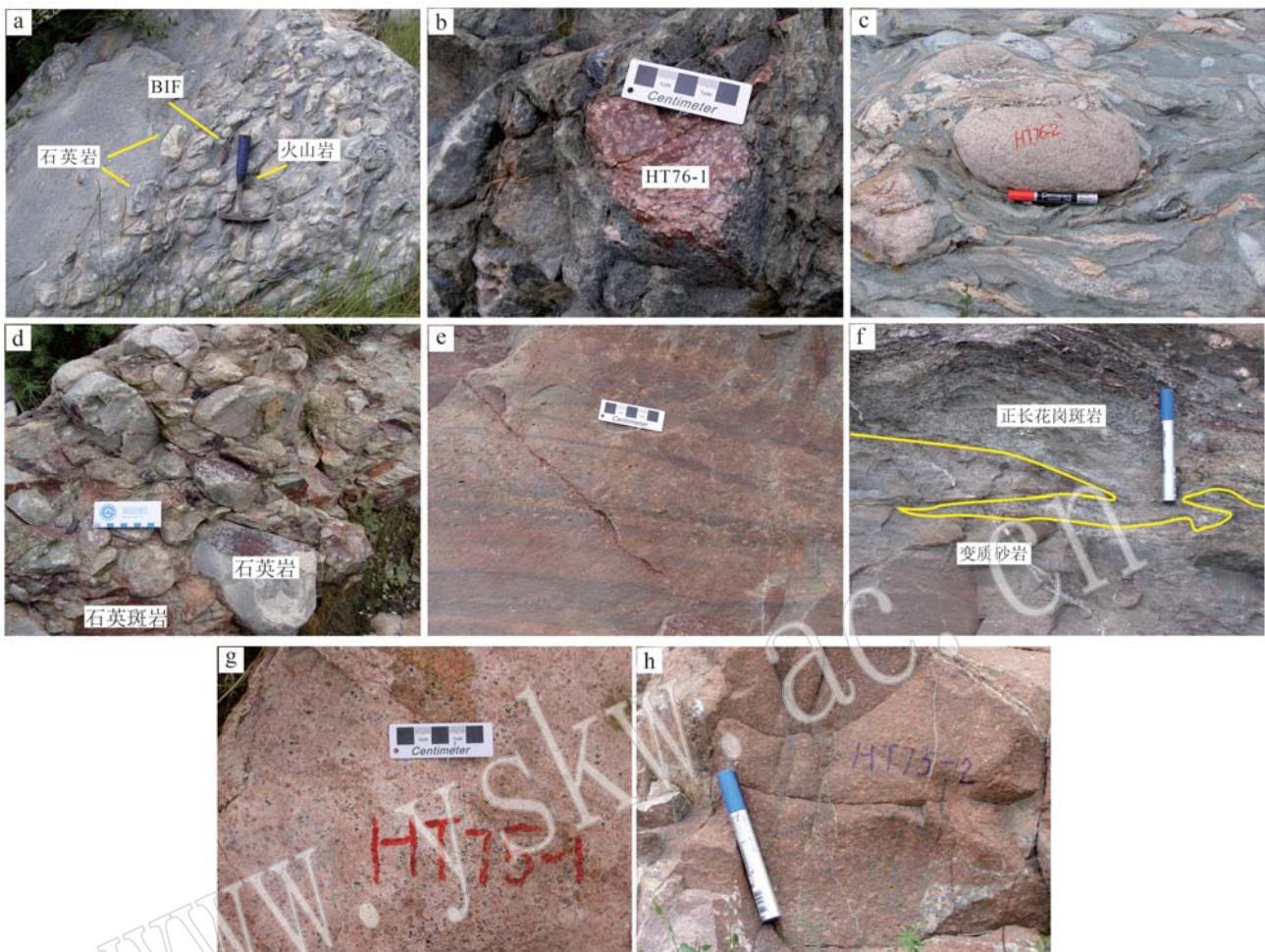


图4 滹沱群四集庄组砾岩及侵入其中的花岗斑岩野外露头特征

Fig. 4 Outcrops of conglomerates in the Sijizhuang Formation and granite-porphyry intrusive

a—土集村北四集庄组砾岩；b—四集庄组砾岩中正长花岗斑岩砾石；c—四集庄组砾岩中二长花岗岩砾石；d—蒋村镇东四集庄组砾岩；

e—蒋村四集庄组变质砂岩中保留的斜层理构造；f—正长花岗斑岩侵入四集庄组变质砂岩；g、h—正长花岗斑岩野外露头特征

a—conglomerate in the Sijizhuang Formation, north of Shiji Village; b—orthoclase granite porphyry pebble in the Sijizhuang Formation; c—monzonitic granite porphyry pebble in the Sijizhuang Formation; d—conglomerate in Sijizhuang Formation, east of Jiangeun Town; e—oblique bedding in metamorphic sandstone of the Sijizhuang Formation near Jiangcun Town; f—the intrusion of syenite granite porphyry into the metamorphic sandstone of the Sijizhuang Formation; g, h—field outcrops of syenite granite porphyry

2012)。分析采用 Neptune Plus 新设计高性能锥组合，在少量氮气加入的条件下能分别提高 Hf、Yb 和 Lu 的分析灵敏度。激光输出能量密度约为 7.0 J/cm^2 。采用单点剥蚀模式，斑束为 $44 \mu\text{m}$ 。分析过程中，采用实时获取锆石样品自身的 β_{Yb} 用于干扰校正。 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.732\ 5$ 和 $^{173}\text{Yb}/^{171}\text{Yb} = 1.1326\ 85$ (Fisher *et al.*, 2014) 被用于计算 Hf 和 Yb 的质量分馏系数 β_{Hf} 和 β_{Yb} 。使用 $^{176}\text{Yb}/^{173}\text{Yb} = 0.796\ 39$ (Fisher *et al.*, 2014) 来扣除 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的同质异位干扰。使用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.026\ 56$ (Blichert-Toft *et al.*, 1997) 来扣除干扰程度相对较小的 ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的同

质异位干扰。由于 Yb 和 Lu 具有相似的物理化学属性，因此在本实验中采用 Yb 的质量分馏系数 β_{Yb} 来校正 Lu 的质量分馏行为。分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、同位素质量分馏校正)采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2010) 完成。为确保分析数据的可靠性，Plešovice、91500 和 GJ-1 这 3 个国际锆石标准与实际样品同时分析，Plešovice 用于进行外标校正以进一步优化分析测试结果。91500 和 GJ-1 作为第 2 标样监控数据校正质量。Plešovice、91500 和 GJ-1 的外部精密度 (2SD) 优于 0.000 020。测试值与推荐值在误差范围内一致，同

时为监控高 Yb/Hf 值锆石的测试数据,采用国际常用的高 Yb/Hf 值标样 Temora 2 监控高 Yb/Hf 值锆石的测试数据。

4.1 锆石 U-Pb 定年

(1) 正长花岗斑岩砾石(HT76-1)

正长花岗斑岩砾石(HT76-1)样品锆石多呈短柱状、粒状,少数呈长柱状,粒度大小 100~300 μm 。在透射光下大多无色透明,部分颗粒表面呈浅黄褐色,柱状颗粒柱面较发育而锥面不发育,所有颗粒都可见较规则的晶面。阴极发光图像中,锆石都显示较典型的韵律环带,具有岩浆锆石特征(图 5)。选择了 28 粒锆石并避开包体和裂纹完成 U-Pb 定年,U、Th 含量分别为 $19 \times 10^{-6} \sim 213 \times 10^{-6}$ 、 $23 \times 10^{-6} \sim 119 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.34~1.30(表 1)。在分析结果中,除 23 号分析点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2685 ± 33 Ma 外,其余分析点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄范围为 $2567 \sim 2463$ Ma。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中,15、17、21 和 25 号分析点具有明显的 Pb 丢失,其余分析点多位于谐和线上或附近(图 6a)。去除可能为捕获锆石的 23 号点和具有强烈 Pb 丢失的 4 个分析点外,其余 23 个点获得 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄结果为 2507 ± 14 Ma(图 6b),代表了砾石源区花岗岩的形成时代。

(2) 似斑状二长花岗岩砾石(HT76-2)

似斑状二长花岗岩砾石(HT76-2)样品锆石多呈短柱状-长柱状,粒度大小 100~300 μm 。在透射光下,部分锆石无色透明,部分颗粒可能由于放射性损伤使内部结构被破坏而透光性较差,个别颗粒表面呈浅黄褐色,锆石颗粒整体柱面发育,具有较规则的晶面。在阴极发光图像中,大部分颗粒内部可见较

明显的岩浆韵律环带,而部分颗粒内部蜕晶质化强烈(图 5)。选择无明显蜕晶质化影响且岩浆结构明显的 24 粒锆石进行 U-Pb 同位素分析,U、Th 含量分别为 $48 \times 10^{-6} \sim 1057 \times 10^{-6}$ 、 $34 \times 10^{-6} \sim 654 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.11~1.54(表 1)。所有分析结果中, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化范围较大($2532 \sim 2285$ Ma)。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中,多数分析点由于强烈的 Pb 丢失而明显偏离谐和线,所有分析结果拟合的不一致线上、下交点年龄分别为 2509 ± 12 Ma 和 77 ± 33 Ma,而位于谐和线上 4 个分析点获得 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄结果为 2519 ± 35 Ma(图 6),与上交点年龄在误差范围内一致,应代表了二长花岗岩砾石源区花岗岩的侵位时代。

(3) 正长花岗斑岩(HT75-2)

正长花岗斑岩(HT75-2)样品中锆石透光下呈无色、淡粉色,多为长柱-短柱状,少量为粒状,粒度 150~400 μm ,柱面非常发育,而锥面多不发育。在阴极发光图像中,大部分锆石颗粒内部具有岩浆振荡环带,个别颗粒具有板状环带(图 5)。选择了 30 粒锆石完成了 U-Pb 同位素分析,U、Th 含量分别为 $13 \times 10^{-6} \sim 54 \times 10^{-6}$ 、 $9 \times 10^{-6} \sim 42 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.58~0.92(表 1)。在所有分析结果中, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄范围为 $2217 \sim 2087$ Ma。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中,除 8 和 18 号分析点具有较明显的 Pb 丢失外,其余 28 个分析点基本位于谐和线上或附近,获得 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2157 ± 15 Ma(图 6),代表了花岗斑岩的形成时代。

4.2 锆石 Lu-Hf 同位素

(1) 正长花岗斑岩砾石(HT76-1)

对该样品中完成 U-Pb 同位素分析的 28 粒锆石,

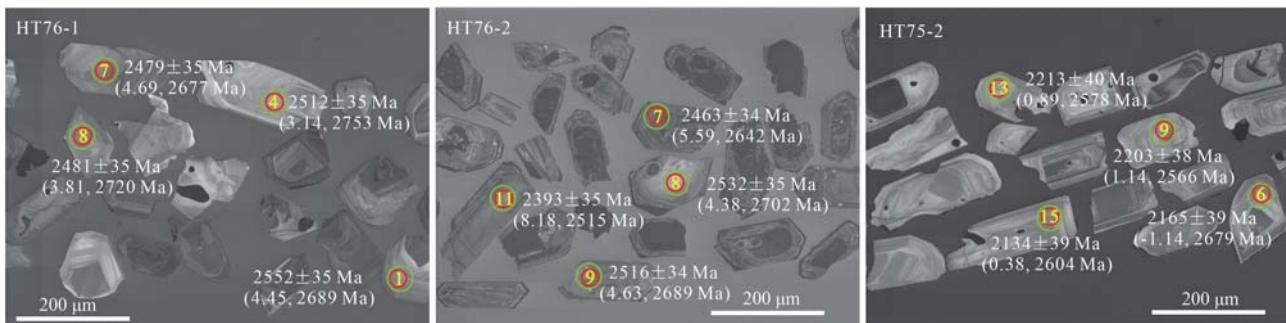


图 5 四集庄组花岗岩砾石及侵入其中的花岗岩锆石 CL 图像

Fig. 5 Zircon CL images of granitic pebbles in the Sijizhuang Formation and granite intrusive

图中红色圈为锆石 U-Pb 分析,绿色圈为 Lu-Hf 分析; 圈中数字为分析点号, 圈外分别为单点分析的锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄、 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值和单阶段模式年龄

the red circles are U-Pb isotope analyses, and the green ones are Lu-Hf isotope analyses; numbers in the circles represent the spot numbers, and marks out the circles represent the zircon $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages, $\epsilon\text{Hf}(t)$, and single stage Hf model ages

表 1 滹沱群四集庄组中花岗岩砾石与花岗岩侵入体锆石 U-Pb 同位素年龄分析表

Table 1 Zircon U-Pb isotopic analyses on granitic pebbles and granitic intrusive in the Sijizhuang Formation of the Hutuo Group

分析点号	同位素比值						同位素年龄/Ma						谐和性 /%				
	$w_B/10^{-6}$	$Pb^{*}/232Th$	^{238}U	Th/U	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	
HT76-1 正长花岗斑岩砾石																	
HT76-1-01	26	23	39	0.59	0.169 41	0.003 55	11.225 09	0.137 63	0.480 50	0.005 37	2.552	35	2.530	23	2.542	11	99
HT76-1-02	64	62	99	0.63	0.163 32	0.003 32	10.486 04	0.116 54	0.465 61	0.005 00	2.490	34	2.464	22	2.479	10	99
HT76-1-03	66	57	100	0.57	0.165 14	0.003 37	10.939 16	0.122 38	0.480 37	0.005 17	2.509	34	2.529	23	2.518	10	99
HT76-1-04	15	11	23	0.49	0.165 40	0.003 51	10.898 25	0.140 06	0.477 83	0.005 45	2.512	35	2.518	24	2.515	12	100
HT76-1-05	22	19	34	0.55	0.167 98	0.003 56	10.535 22	0.134 72	0.454 82	0.005 17	2.538	35	2.417	23	2.483	12	95
HT76-1-06	27	23	42	0.55	0.164 45	0.003 41	10.716 75	0.127 68	0.472 61	0.005 21	2.502	35	2.495	23	2.499	11	100
HT76-1-07	33	27	53	0.51	0.162 19	0.003 39	9.850 35	0.120 59	0.440 46	0.004 91	2.479	35	2.353	22	2.421	11	95
HT76-1-08	25	21	38	0.56	0.162 41	0.003 38	10.523 18	0.126 11	0.469 91	0.005 20	2.481	35	2.483	23	2.482	11	100
HT76-1-09	67	75	103	0.73	0.161 01	0.003 30	10.103 10	0.115 62	0.455 05	0.004 94	2.466	34	2.418	22	2.444	11	98
HT76-1-10	132	116	213	0.55	0.170 95	0.003 48	10.437 59	0.11629	0.442 79	0.004 76	2.567	34	2.363	21	2.474	10	92
HT76-1-12	30	25	45	0.55	0.167 58	0.003 46	11.144 30	0.131 36	0.482 29	0.005 31	2.534	34	2.537	23	2.535	11	100
HT76-1-13	20	23	31	0.75	0.165 24	0.003 46	10.378 14	0.127 68	0.455 50	0.005 10	2.510	35	2.420	23	2.469	11	96
HT76-1-14	22	18	35	0.51	0.164 63	0.003 43	10.435 59	0.126 10	0.459 72	0.005 11	2.504	35	2.438	23	2.474	11	97
HT76-1-15	15	41	43	0.94	0.168 32	0.003 73	6.356 80	0.089 82	0.273 90	0.003 20	2.541	37	1.561	16	2.026	12	61
HT76-1-16	74	83	106	0.79	0.166 33	0.003 39	11.146 30	0.125 76	0.486 00	0.005 26	2.521	34	2.553	23	2.535	11	99
HT76-1-17	40	119	92	1.30	0.163 67	0.003 37	6.801 46	0.078 43	0.301 37	0.003 27	2.494	34	1.698	16	2.086	10	68
HT76-1-18	63	49	101	0.49	0.165 86	0.003 38	10.403 87	0.116 70	0.454 93	0.004 91	2.516	34	2.417	22	2.471	10	96
HT76-1-19	30	23	52	0.44	0.164 27	0.003 47	9.521 01	0.120 69	0.420 35	0.004 76	2.500	35	2.262	22	2.390	12	90
HT76-1-20	39	54	58	0.93	0.168 74	0.003 47	10.630 82	0.123 38	0.456 92	0.005 00	2.545	34	2.426	22	2.491	11	95
HT76-1-21	16	11	34	0.34	0.164 54	0.003 56	7.286 44	0.097 80	0.321 16	0.003 70	2.503	36	1.795	18	2.147	12	72
HT76-1-22	17	13	26	0.50	0.163 57	0.003 46	10.677 65	0.155 95	0.473 43	0.005 39	2.493	35	2.499	24	2.496	12	100
HT76-1-23	64	40	90	0.45	0.183 49	0.003 75	13.354 62	0.151 69	0.527 85	0.005 25	2.685	33	2.732	24	2.705	11	98
HT76-1-24	22	27	34	0.80	0.163 10	0.003 43	10.430 76	0.130 28	0.463 84	0.005 23	2.488	35	2.457	23	2.474	12	99
HT76-1-25	24	34	78	0.43	0.164 99	0.003 52	7.442 96	0.096 04	0.327 19	0.003 71	2.507	35	1.825	18	2.166	12	73
HT76-1-26	21	17	33	0.50	0.163 80	0.003 43	10.529 29	0.130 51	0.466 22	0.005 25	2.495	35	2.467	23	2.483	11	99
HT76-1-28	46	36	76	0.47	0.164 20	0.003 36	10.057 61	0.114 40	0.444 25	0.004 83	2.499	34	2.370	22	2.440	11	95
HT76-1-29	46	40	75	0.53	0.160 70	0.003 29	9.894 08	0.113 56	0.446 54	0.004 87	2.463	34	2.380	22	2.425	11	97
HT76-1-30	12	10	19	0.50	0.162 90	0.003 50	10.757 43	0.143 53	0.478 94	0.005 56	2.486	36	2.523	24	2.502	12	99

续表 1-1
Continued Table 1-1

分析点号	$w_B/10^{-6}$			$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			同位素年龄/Ma					
	Pb^*	^{232}Th	^{238}U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	谐和性	/%			
HT76-2 似斑状二长花岗岩砾石																											
HT76-2-01	286	361	999	0.36	0.166	63	0.003	46	4.741	34	0.052	34	0.206	36	0.002	17	2.524	34	1.209	12	1.775	9	48				
HT76-2-02	112	120	192	0.62	0.166	22	0.003	45	9.898	96	0.109	76	0.431	90	0.004	57	2.520	34	2.314	21	2.425	10	92				
HT76-2-03	139	323	497	0.65	0.160	15	0.003	32	4.304	15	0.047	51	0.19491	0.002	05	2.457	35	1.148	11	1.694	9	47					
HT76-2-04	183	204	369	0.55	0.163	69	0.003	39	8.014	52	0.088	36	0.35507	0.003	75	2.494	34	1.959	18	2.233	10	79					
HT76-2-05	141	177	861	0.21	0.158	96	0.003	31	2.702	70	0.030	36	0.12331	0.001	30	2.445	35	750	7	1.329	8	31					
HT76-2-06	107	96	706	0.14	0.154	28	0.003	21	2.076	53	0.023	40	0.09761	0.001	03	2.394	35	600	6	1.141	8	25					
HT76-2-07	162	653	604	1.08	0.160	70	0.003	31	3.625	47	0.039	57	0.16361	0.001	72	2.463	34	977	10	1.555	9	40					
HT76-2-08	41	55	60	0.93	0.167	42	0.003	50	10.662	96	0.123	23	0.461	90	0.004	98	2.532	35	2.448	22	2.494	11	97				
HT76-2-09	80	85	122	0.69	0.165	82	0.003	42	10.486	79	0.116	60	0.458	66	0.004	87	2.516	34	2.434	22	2.479	10	97				
HT76-2-10	199	234	429	0.55	0.164	97	0.003	40	7.543	92	0.083	50	0.331	65	0.003	51	2.507	34	1.846	17	2.178	10	74				
HT76-2-11	89	496	727	0.68	0.154	17	0.003	20	2.102	27	0.023	63	0.098	89	0.001	05	2.393	35	608	6	1.150	8	25				
HT76-2-12	205	385	1 057	0.36	0.160	14	0.003	29	3.215	65	0.035	29	0.145	63	0.001	53	2.457	34	876	9	1.461	9	36				
HT76-2-13	133	238	315	0.75	0.165	63	0.003	40	8.615	77	0.094	76	0.377	26	0.003	99	2.514	34	2.064	19	2.298	10	82				
HT76-2-14	58	330	214	1.54	0.164	75	0.003	39	4.530	71	0.050	37	0.199	44	0.002	11	2.505	34	1.172	11	1.737	9	47				
HT76-2-15	33	34	48	0.71	0.164	91	0.003	44	10.886	29	0.128	36	0.478	74	0.005	21	2.507	35	2.522	23	2.514	11	99				
HT76-2-16	47	144	166	0.87	0.158	96	0.003	30	4.183	83	0.048	19	0.190	88	0.002	04	2.445	35	1.126	11	1.671	9	46				
HT76-2-17	105	392	460	0.85	0.157	01	0.003	22	3.439	19	0.038	04	0.158	85	0.001	68	2.424	34	950	9	1.513	9	39				
HT76-2-18	231	294	536	0.55	0.159	65	0.003	25	6.593	80	0.070	81	0.299	53	0.003	14	2.452	34	1.689	16	2.059	9	69				
HT76-2-19	68	136	266	0.51	0.156	92	0.003	21	4.052	10	0.044	82	0.187	28	0.001	98	2.423	34	1.107	11	1.645	9	46				
HT76-2-20	41	70	99	0.99	0.164	23	0.003	40	8.850	26	0.102	00	0.390	81	0.004	21	2.500	34	2.127	20	2.323	11	85				
HT76-2-21	66	87	144	0.61	0.158	55	0.003	26	6.977	03	0.079	11	0.319	13	0.003	41	2.440	34	1.786	17	2.109	10	73				
HT76-2-22	98	79	154	0.52	0.162	35	0.003	31	10.463	55	0.115	41	0.467	41	0.004	97	2.480	34	2.472	22	2.477	10	100				
HT76-2-23	167	102	962	0.11	0.156	29	0.003	18	2.991	96	0.032	54	0.138	83	0.001	46	2.416	34	838	8	1.406	8	35				
HT76-2-24	110	654	1 045	0.63	0.144	73	0.002	96	1.356	26	0.015	02	0.067	96	0.000	72	2.285	35	424	4	870	6	19				

续表 1-2
Continued Table 1-2

分析点号	同位素比值						同位素年龄/Ma				谐和性 /%
	Pb*	^{232}Th	^{238}U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
HT75-2 正长花岗斑岩											
HT75-2-01	9	12.65	17.45	0.72	0.13493	0.00308	6.93649	0.10165	0.37283	0.00430	2.163
HT75-2-02	14	18.56	24.03	0.77	0.13089	0.00293	6.94357	0.09682	0.38471	0.00434	2.110
HT75-2-03	10	10.95	18.23	0.60	0.13917	0.00318	7.18257	0.10513	0.37430	0.00432	2.217
HT75-2-04	12	14.97	21.08	0.71	0.13668	0.00307	7.43007	0.10410	0.39424	0.00447	2.186
HT75-2-05	13	15.21	22.77	0.67	0.13808	0.00312	7.09183	0.10087	0.37248	0.00425	2.203
HT75-2-06	10	12.56	19.28	0.65	0.13505	0.00305	6.93718	0.09901	0.37252	0.00425	2.165
HT75-2-07	15	18.95	28.31	0.67	0.13410	0.00306	6.81837	0.09975	0.36875	0.00426	2.152
HT75-2-08	19	32.9	43.62	0.75	0.13838	0.00300	5.78539	0.07297	0.30322	0.00329	2.207
HT75-2-09	12	18.15	21.45	0.85	0.13809	0.00307	6.88707	0.09410	0.36171	0.00407	2.203
HT75-2-10	29	41.76	53.52	0.78	0.13625	0.00293	6.93609	0.08577	0.36920	0.00400	2.180
HT75-2-11	22	40.86	48.6	0.84	0.13382	0.00300	6.84245	0.09584	0.37082	0.00421	2.149
HT75-2-12	13	13.99	22.35	0.63	0.13698	0.00302	7.45285	0.10034	0.39459	0.00442	2.189
HT75-2-13	9	14.13	16.63	0.85	0.13883	0.00323	7.50096	0.11581	0.39186	0.00466	2.213
HT75-2-14	9	10.19	17.62	0.58	0.12921	0.00294	6.68835	0.09751	0.37542	0.00431	2.087
HT75-2-15	12	17.82	20.48	0.87	0.13268	0.00299	7.13230	0.10173	0.38987	0.00446	2.134
HT75-2-16	7	8.52	13.14	0.65	0.13703	0.00335	6.91174	0.11908	0.36582	0.00456	2.190
HT75-2-17	15	19.61	27.26	0.72	0.13260	0.00295	7.02430	0.09726	0.38419	0.00435	2.133
HT75-2-18	15	33.86	38.95	0.87	0.13041	0.00326	6.22198	0.11189	0.34604	0.00437	2.103
HT75-2-19	9	10.92	17.68	0.62	0.13762	0.00314	7.12039	0.10487	0.37526	0.00436	2.197
HT75-2-20	10	12.26	18.74	0.65	0.13396	0.00308	6.86653	0.10328	0.37175	0.00434	2.151
HT75-2-21	9	12.5	15.61	0.80	0.13126	0.00302	6.79361	0.10258	0.37538	0.00439	2.115
HT75-2-22	9	14.4	16.1	0.89	0.13499	0.00309	7.09188	0.10613	0.38103	0.00446	2.164
HT75-2-23	11	17.59	19.04	0.92	0.13431	0.00310	6.94464	0.10575	0.37501	0.00441	2.155
HT75-2-24	11	13.5	19.41	0.70	0.13320	0.00307	7.18228	0.10948	0.39109	0.00462	2.141
HT75-2-25	10	12.39	17.33	0.71	0.13443	0.00306	7.46230	0.11083	0.40263	0.00469	2.157
HT75-2-26	9	11.6	15.86	0.73	0.13061	0.00303	6.84264	0.10584	0.38000	0.00450	2.106
HT75-2-27	8	10.19	16.07	0.63	0.13432	0.00306	6.87582	0.10203	0.37129	0.00431	2.155
HT75-2-28	9	10.44	17.86	0.58	0.13237	0.00306	6.87187	0.10579	0.37654	0.00446	2.130
HT75-2-29	9	10.44	17.34	0.60	0.13440	0.00314	6.93328	0.10954	0.37416	0.00449	2.156
HT75-2-30	8	8.74	15.12	0.58	0.12924	0.00299	6.65264	0.10211	0.37336	0.00438	2.088

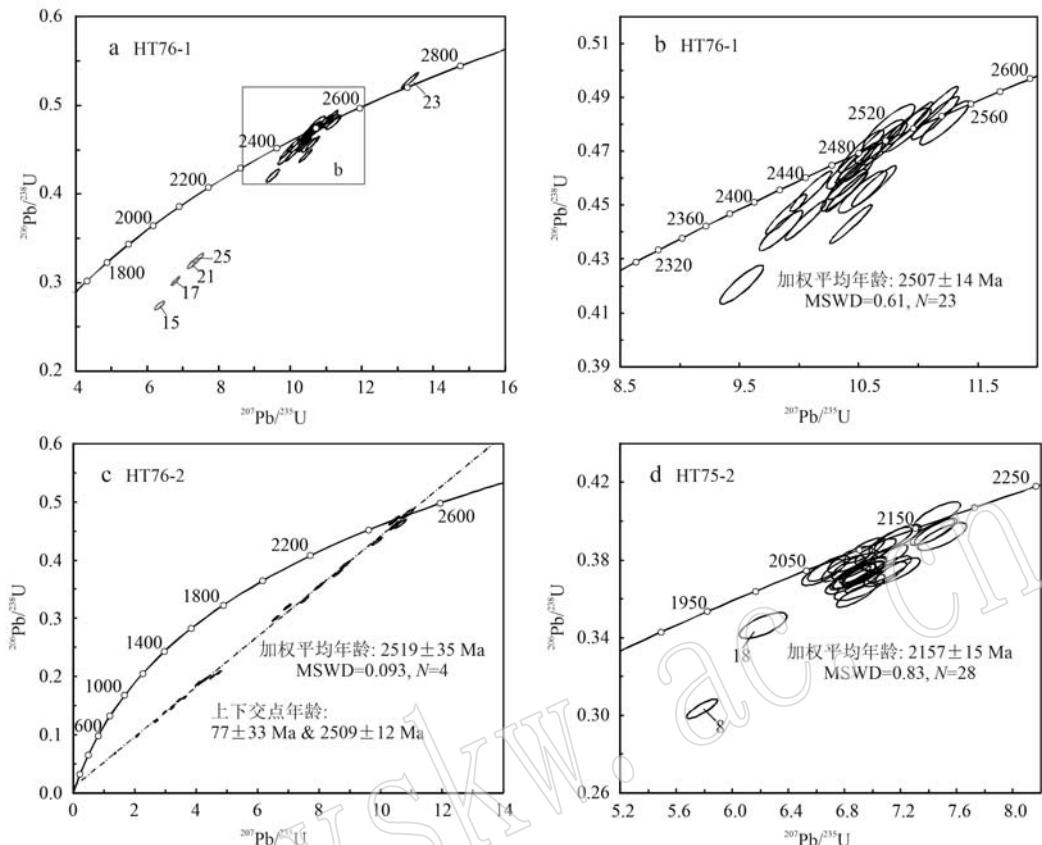


图 6 花岗岩砾石及花岗岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 6 Zircon U-Pb concordia of granitic pebbles and granitic intrusive

尽可能在原 U-Pb 定年位置进行 Lu-Hf 同位素分析, 具体结果见表 2。 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值范围为 0.000 407 ~ 0.001 319, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281 235 ~ 0.281 364。Hf 同位素计算中, 除 23 号分析点由于和主体年龄结果不能归于一组而采用该点具体的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄外, 其余分析点采用锆石的加权平均年龄结果计算。相应的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ 值为 0.281 240 ~ 0.281 332, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值范围为 +2.1 ~ +5.38, 单阶段和两阶段模式年龄分别为 2 780 ~ 2 612 Ma 和 2 808 ~ 2 643 Ma(表 2)。在 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄与 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值关系图中, 2.7 Ga 和 2.5 Ga 的锆石分析结果都位于 0.75 倍亏损地幔和球粒陨石演化线之间(图 7)。

(2) 似斑状二长花岗岩砾石(HT76-2)

对似斑状二长花岗岩(HT76-2)中完成 U-Pb 同位素分析的 24 粒锆石进行了 Lu-Hf 同位素分析, 结果见表 2。 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值范围为 0.000 423 ~ 0.002 955, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281 308 ~ 0.281 546。由于该样品中锆石 U-Pb 年龄结果普遍具有较强烈的 Pb 丢失, 而 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值与 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄并无明显相关

性(图略), 表明 Lu-Hf 同位素体系在 Pb 丢失过程中并未遭受明显的影响。因此, 在 Hf 同位素计算过程中, 采用该样品的加权平均年龄结果进行计算。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ 值为 0.281 227 ~ 0.281 403, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值范围为 +1.89 ~ +8.18, 单阶段和两阶段模式年龄分别为 2 763 ~ 2 515 Ma 和 2 824 ~ 2 515 Ma(表 2)。在 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄与 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值关系图中, 二长花岗岩锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值大部分位于 0.75 倍亏损地幔和球粒陨石演化线之间, 少量分析结果位于亏损地幔和 0.75 倍亏损地幔之间(图 7)。

(3) 正长花岗斑岩(HT75-2)

对正长花岗斑岩(HT75-2)中完成 U-Pb 年龄测试的 30 粒锆石进行 Lu-Hf 同位素分析, 结果见表 2。 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值范围为 0.000 453 ~ 0.001 177, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281 385 ~ 0.281 480。所有的分析点采用锆石 U-Pb 年龄的加权平均结果进行计算, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ 值为 0.281 337 ~ 0.281 443, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值范围为 -2.5 ~ +1.26, 单阶段和两阶段模式年龄分别为 2 618 ~ 2 468 Ma 和 2 746 ~ 2 560 Ma(表 2)。在锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄与 $\epsilon\text{Hf}(t)$

表 2 滹沱群四集庄砾岩中花岗岩砾石与花岗岩侵入体锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 2 Zircon Lu-Hf isotopic analyses on granitic pebbles and granitic intrusive in the Sijizhuang Formation of the Hutuo Group

分析点号	年龄值	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$f_{\text{La/Hf}}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_\text{i}$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_DM/Ma	t_UC/Ma
HT76-1 正长花岗斑岩砾石												
HT76-1-01	2 507	0.015 523	0.000 086	0.000 569	0.000 003	0.281 333	0.000 014	-0.98	0.281 306	-50.9	4.45	2 647
HT76-1-02	2 507	0.019 264	0.000 097	0.000 692	0.000 003	0.281 317	0.000 017	-0.98	0.281 284	-51.5	3.65	2 678
HT76-1-03	2 507	0.030 385	0.000 485	0.001 025	0.000 018	0.281 328	0.000 017	-0.97	0.281 279	-51.1	3.46	2 686
HT76-1-04	2 507	0.021 194	0.000 150	0.000 733	0.000 006	0.281 305	0.000 016	-0.98	0.281 269	-51.9	3.14	2 697
HT76-1-05	2 507	0.016 801	0.000 071	0.000 600	0.000 003	0.281 322	0.000 016	-0.98	0.281 294	-51.3	4.00	2 664
HT76-1-06	2 507	0.021 315	0.000 280	0.000 731	0.000 011	0.281 346	0.000 016	-0.98	0.281 311	-50.4	4.63	2 641
HT76-1-07	2 507	0.013 103	0.000 115	0.000 478	0.000 004	0.281 336	0.000 017	-0.99	0.281 313	-50.8	4.69	2 637
HT76-1-08	2 507	0.014 746	0.000 038	0.000 510	0.000 002	0.281 313	0.000 016	-0.98	0.281 288	-51.6	3.81	2 671
HT76-1-09	2 507	0.037 695	0.000 472	0.001 319	0.000 016	0.281 348	0.000 016	-0.96	0.281 284	-50.4	3.67	2 680
HT76-1-10	2 507	0.022 988	0.000 293	0.000 933	0.000 013	0.281 341	0.000 016	-0.97	0.281 296	-50.6	4.10	2 662
HT76-1-12	2 507	0.016 142	0.000 074	0.000 554	0.000 002	0.281 345	0.000 016	-0.98	0.281 319	-50.5	4.90	2 630
HT76-1-13	2 507	0.029 009	0.000 202	0.000 984	0.000 008	0.281 345	0.000 017	-0.97	0.281 297	-50.5	4.14	2 660
HT76-1-14	2 507	0.013 952	0.000 207	0.000 496	0.000 007	0.281 297	0.000 017	-0.99	0.281 273	-52.2	3.27	2 691
HT76-1-15	2 507	0.026 873	0.000 508	0.000 897	0.000 013	0.281 360	0.000 024	-0.97	0.281 317	-49.9	4.82	2 634
HT76-1-16	2 507	0.011 941	0.000 123	0.000 407	0.000 003	0.281 290	0.000 014	-0.99	0.281 270	-52.4	3.18	2 694
HT76-1-17	2 507	0.023 476	0.000 311	0.000 781	0.000 012	0.281 320	0.000 016	-0.98	0.281 283	-51.3	3.62	2 679
HT76-1-18	2 507	0.019 849	0.000 034	0.000 667	0.000 001	0.281 364	0.000 019	-0.98	0.281 332	-49.8	5.35	2 613
HT76-1-19	2 507	0.013 087	0.000 166	0.000 457	0.000 005	0.281 341	0.000 019	-0.99	0.281 319	-50.6	4.91	2 629
HT76-1-20	2 507	0.017 215	0.000 213	0.000 604	0.000 005	0.281 269	0.000 018	-0.98	0.281 240	-53.1	2.10	2 736
HT76-1-21	2 507	0.021 483	0.000 131	0.000 773	0.000 004	0.281 344	0.000 021	-0.98	0.281 307	-50.5	4.46	2 647
HT76-1-22	2 507	0.015 088	0.000 135	0.000 525	0.000 005	0.281 357	0.000 022	-0.98	0.281 332	-50.0	5.38	2 612
HT76-1-23	2 685	0.014 242	0.000 093	0.000 564	0.000 001	0.281 235	0.000 021	-0.98	0.281 206	-54.4	4.99	2 780
HT76-1-24	2 507	0.027 385	0.000 127	0.000 891	0.000 005	0.281 345	0.000 028	-0.97	0.281 302	-50.5	4.30	2 654
HT76-1-25	2 507	0.033 957	0.001 279	0.000 971	0.000 029	0.281 319	0.000 019	-0.97	0.281 273	-51.4	3.26	2 694
HT76-1-26	2 507	0.012 712	0.000 169	0.000 439	0.000 005	0.281 338	0.000 020	-0.99	0.281 317	-50.7	4.83	2 632
HT76-1-28	2 507	0.019 534	0.000 071	0.000 656	0.000 001	0.281 324	0.000 025	-0.98	0.281 292	-51.2	3.96	2 666
HT76-1-29	2 507	0.016 503	0.000 190	0.000 561	0.000 004	0.281 342	0.000 021	-0.98	0.281 315	-50.6	4.77	2 635
HT76-1-30	2 507	0.020 487	0.000 046	0.000 685	0.000 002	0.281 326	0.000 021	-0.98	0.281 293	-51.1	3.99	2 665
HT76-2 似斑状二长花岗岩砾石												
HT76-2-01	2 519	0.068 723	0.000 695	0.001 936	0.000 011	0.281 454	0.000 020	-0.94	0.281 360	-46.6	6.66	2 576
HT76-2-02	2 519	0.030 890	0.000 118	0.000 968	0.000 005	0.281 378	0.000 018	-0.97	0.281 331	-49.3	5.62	2 614
HT76-2-03	2 519	0.028 838	0.000 715	0.000 917	0.000 021	0.281 395	0.000 017	-0.97	0.281 351	-48.7	6.32	2 587

续表 2-1

Continued Table 2-1

分析点号	年龄/值	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$f_{\text{Lu/Hf}}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{\text{i}}$	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(\tau)$	t_{DM}/Ma	t_{UC}/Ma
HT76-2-04	2.519	0.059 594	0.000 679	0.001 922	0.000 017	0.281 461	0.000 019	-0.94	0.281 368	-46.4	6.92	2.565	2.577
HT76-2-05	2.519	0.046 843	0.000 992	0.001 515	0.000 029	0.281 413	0.000 022	-0.95	0.281 340	-48.1	5.92	2.604	2.626
HT76-2-06	2.519	0.026 575	0.000 084	0.000 870	0.000 003	0.281 357	0.000 019	-0.97	0.281 315	-50.1	5.03	2.636	2.670
HT76-2-07	2.519	0.033 867	0.000 194	0.000 953	0.000 007	0.281 377	0.000 019	-0.97	0.281 331	-49.3	5.59	2.615	2.642
HT76-2-08	2.519	0.020 008	0.000 252	0.000 611	0.000 008	0.281 326	0.000 018	-0.98	0.281 296	-51.1	4.38	2.660	2.702
HT76-2-09	2.519	0.028 625	0.000 307	0.000 920	0.000 011	0.281 348	0.000 017	-0.97	0.281 304	-50.4	4.63	2.652	2.689
HT76-2-10	2.519	0.033 729	0.001 114	0.001 113	0.000 034	0.281 402	0.000 033	-0.97	0.281 348	-48.5	6.21	2.591	2.612
HT76-2-11	2.519	0.101 224	0.002 066	0.000 595	0.000 050	0.281 546	0.000 026	-0.91	0.281 403	-43.4	8.18	2.515	2.515
HT76-2-12	2.519	0.070 545	0.000 540	0.002 238	0.000 014	0.281 449	0.000 027	-0.93	0.281 342	-46.8	5.99	2.603	2.623
HT76-2-13	2.519	0.043 224	0.000 325	0.001 404	0.000 007	0.281 371	0.000 018	-0.96	0.281 303	-49.5	4.63	2.653	2.690
HT76-2-14	2.519	0.023 006	0.000 323	0.000 726	0.000 010	0.281 321	0.000 018	-0.98	0.281 286	-51.3	4.01	2.675	2.720
HT76-2-15	2.519	0.017 502	0.000 043	0.000 553	0.000 001	0.281 333	0.000 023	-0.98	0.281 306	-50.9	4.74	2.646	2.684
HT76-2-16	2.519	0.028 262	0.000 582	0.000 860	0.000 017	0.281 370	0.000 030	-0.97	0.281 328	-49.6	5.51	2.618	2.646
HT76-2-17	2.519	0.038 507	0.000 769	0.001 125	0.000 019	0.281 387	0.000 043	-0.97	0.281 333	-49.0	5.68	2.612	2.638
HT76-2-18	2.519	0.027 470	0.000 223	0.000 861	0.000 006	0.281 354	0.000 062	-0.97	0.281 312	-50.2	4.94	2.640	2.674
HT76-2-19	2.519	0.046 435	0.000 548	0.001 334	0.000 008	0.281 441	0.000 044	-0.96	0.281 376	-47.1	7.23	2.553	2.562
HT76-2-20	2.519	0.013 164	0.000 055	0.000 423	0.000 002	0.281 308	0.000 028	-0.99	0.281 288	-51.8	4.07	2.671	2.717
HT76-2-21	2.519	0.027 244	0.000 770	0.000 780	0.000 022	0.281 407	0.000 037	-0.98	0.281 369	-48.3	6.97	2.562	2.574
HT76-2-22	2.519	0.048 663	0.000 305	0.001 460	0.000 013	0.281 370	0.000 040	-0.96	0.281 300	-49.6	4.49	2.659	2.697
HT76-2-23	2.519	0.049 526	0.000 524	0.001 555	0.000 018	0.281 340	0.000 036	-0.95	0.281 265	-50.6	3.26	2.707	2.757
HT76-2-24	2.519	0.072 193	0.000 791	0.001 998	0.000 021	0.281 323	0.000 088	-0.94	0.281 227	-51.3	1.89	2.763	2.824
HT75-2 正长花岗斑岩													
HT75-2-01	2.157	0.018 600	0.000 120	0.000 627	0.000 003	0.281 439	0.000 016	-0.98	0.281 413	-47.1	0.19	2.509	2.613
HT75-2-02	2.157	0.030 452	0.000 343	0.000 981	0.000 008	0.281 462	0.000 018	-0.97	0.281 422	-46.3	0.50	2.500	2.597
HT75-2-03	2.157	0.014 305	0.000 184	0.000 484	0.000 004	0.281 417	0.000 017	-0.99	0.281 398	-47.9	-0.36	2.528	2.640
HT75-2-04	2.157	0.022 776	0.000 111	0.000 761	0.000 005	0.281 433	0.000 022	-0.98	0.281 402	-47.3	-0.21	2.525	2.632
HT75-2-05	2.157	0.016 902	0.000 283	0.000 563	0.000 007	0.281 456	0.000 016	-0.98	0.281 433	-46.5	0.89	2.481	2.578
HT75-2-06	2.157	0.016 180	0.000 073	0.000 567	0.000 003	0.281 399	0.000 026	-0.98	0.281 376	-48.6	-1.14	2.559	2.679
HT75-2-07	2.157	0.020 707	0.000 144	0.000 681	0.000 006	0.281 394	0.000 018	-0.98	0.281 366	-48.7	-1.48	2.573	2.695
HT75-2-08	2.157	0.023 505	0.000 142	0.000 779	0.000 003	0.281 429	0.000 018	-0.98	0.281 397	-47.5	-0.38	2.532	2.641
HT75-2-09	2.157	0.030 170	0.000 206	0.000 968	0.000 005	0.281 480	0.000 020	-0.97	0.281 440	-45.7	1.14	2.475	2.566

续表 2-2

Continued Table 2-2

分析点号	年龄/值	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$f_{\text{Lu/Hf}}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM}/Ma	t_{UC}/Ma
HT75-2-10	2 157	0.030 884	0.000 186	0.000 987	0.000 006	0.281 475	0.000 016	-0.97	0.281 434	-45.9	0.94	2 483	2 576
HT75-2-11	2 157	0.023 154	0.000 359	0.000 741	0.000 008	0.281 430	0.000 016	-0.98	0.281 399	-47.5	-0.31	2 529	2 637
HT75-2-12	2 157	0.022 583	0.000 074	0.000 744	0.000 003	0.281 422	0.000 017	-0.98	0.281 392	-47.7	-0.56	2 538	2 650
HT75-2-13	2 157	0.017 257	0.000 190	0.000 583	0.000 004	0.281 457	0.000 018	-0.98	0.281 433	-46.5	0.89	2 482	2 578
HT75-2-14	2 157	0.013 938	0.000 057	0.000 467	0.000 001	0.281 448	0.000 018	-0.99	0.281 429	-46.8	0.75	2 486	2 585
HT75-2-15	2 157	0.032 771	0.000 073	0.001 061	0.000 005	0.281 462	0.000 019	-0.97	0.281 418	-46.3	0.38	2 506	2 604
HT75-2-16	2 157	0.016 562	0.000 190	0.000 558	0.000 004	0.281 410	0.000 018	-0.98	0.281 387	-48.2	-0.72	2 543	2 658
HT75-2-17	2 157	0.021 272	0.000 155	0.000 697	0.000 002	0.281 472	0.000 018	-0.98	0.281 443	-46.0	1.26	2 468	2 560
HT75-2-18	2 157	0.031 667	0.000 268	0.001 082	0.000 008	0.281 404	0.000 035	-0.97	0.281 359	-48.4	-1.71	2 586	2 707
HT75-2-19	2 157	0.016 947	0.000 123	0.000 559	0.000 006	0.281 460	0.000 019	-0.98	0.281 437	-46.4	1.03	2 476	2 571
HT75-2-20	2 157	0.015 841	0.000 120	0.000 536	0.000 003	0.281 414	0.000 020	-0.98	0.281 392	-48.0	-0.54	2 536	2 649
HT75-2-21	2 157	0.031 007	0.000 056	0.000 990	0.000 002	0.281 450	0.000 020	-0.97	0.281 409	-46.8	0.06	2 517	2 619
HT75-2-22	2 157	0.019 033	0.000 274	0.000 635	0.000 006	0.281 410	0.000 020	-0.98	0.281 384	-48.2	-0.86	2 549	2 665
HT75-2-23	2 157	0.027 981	0.000 184	0.000 923	0.000 005	0.281 447	0.000 021	-0.97	0.281 409	-46.9	0.05	2 517	2 620
HT75-2-24	2 157	0.017 542	0.000 451	0.000 573	0.000 013	0.281 385	0.000 022	-0.98	0.281 361	-49.1	-1.65	2 578	2 704
HT75-2-25	2 157	0.021 953	0.000 052	0.000 723	0.000 004	0.281 400	0.000 020	-0.98	0.281 370	-48.5	-1.33	2 567	2 688
HT75-2-26	2 157	0.035 099	0.000 808	0.001 177	0.000 027	0.281 386	0.000 040	-0.96	0.281 337	-49.0	-2.50	2 618	2 746
HT75-2-27	2 157	0.013 979	0.000 053	0.000 472	0.000 002	0.281 428	0.000 020	0.99	0.281 409	-47.5	0.04	2 513	2 620
HT75-2-28	2 157	0.013 529	0.000 139	0.000 453	0.000 002	0.281 424	0.000 019	-0.99	0.281 405	-47.7	-0.09	2 518	2 627
HT75-2-29	2 157	0.017 274	0.000 118	0.000 595	0.000 004	0.281 435	0.000 023	-0.98	0.281 411	-47.3	0.12	2 511	2 616
HT75-2-30	2 157	0.015 558	0.000 110	0.000 513	0.000 002	0.281 446	0.000 022	-0.98	0.281 425	-46.9	0.61	2 492	2 592

注: 钇石 Hf 同位素计算所用的参数为: ^{176}Lu 衰变常数 $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}$, 球粒陨石 (CHUR) 的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.033$ 2, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282$ 772 (Blichert-Toft and Alabarre, 1997); 亏损地幔 (DM) 的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.038$ 4, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.283$ 25 (Griffin et al., 2000); 长英质 (felsic) 上地壳 (UC, upper crust) 的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 为 -0.72 (Vervoort et al., 2000)

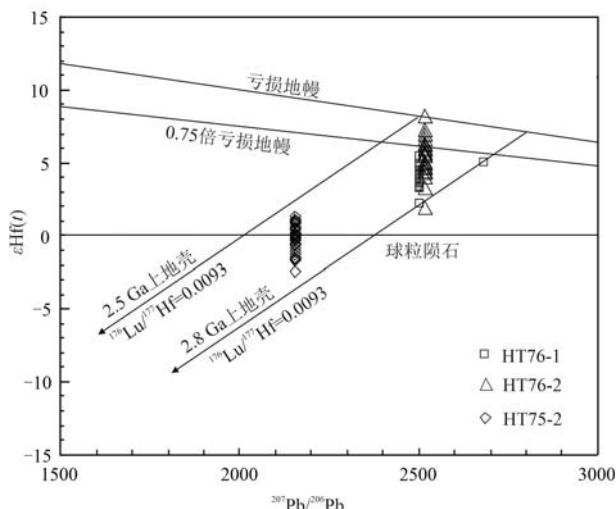


图7 花岗岩砾石与花岗岩锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄与 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 关系图

Fig. 7 Zircon $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages versus $\varepsilon\text{Hf}(t)$ of granitic pebbles and granite intrusive

图中0.75倍亏损地幔演化线引自Belousova等(2010);位于该线与亏损地幔演化线之间区域被定义为来自新生地壳(Belousova et al., 2010)

0.75 times depleted mantle evolution line is from Belousova et al. (2010). $\varepsilon\text{Hf}(t)$ value between the 0.75 times and depleted mantle evolution lines is defined as the juvenile crust (Belousova et al., 2010)

值关系图中,所有分析点的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值在球粒陨石演化线上下波动,并位于2.8~2.5 Ga上地壳演化线之间(图7)。

5 砾岩物质源区及新太古代地壳生长

已有研究表明,滹沱群底部四集庄组砾岩的物质源区来自于下伏的五台群和同期的花岗质片麻岩(白瑾, 1986; Zhang et al., 2006; 伍家善等, 2008; 万渝生等, 2010; 杜利林等, 2013; Peng et al., 2023)。但砾岩中的花岗岩砾石成分及锆石U-Pb年龄结果表明,其中的花岗岩源区主要为五台地区的TTG质片麻岩(Zhang et al., 2006; 伍家善等, 2008; 杜利林等, 2013)。本次工作所采集的砾石样品野外特征和矿物组成与典型的五台地区TTG片麻岩具有较大的差别,岩性为二长-钾质花岗岩。现有研究资料表明,五台地区新太古代晚期二长-钾质花岗片麻岩主要为兰芝山花岗岩和部分峨口花岗岩(Liu et al., 1985; 白瑾, 1986)。早期通过传统多颗粒锆石U-Pb法获得兰芝山花岗岩的形成年龄为 $2\ 560 \pm 6\text{ Ma}$ (Liu et al., 1985)。Wilde等(1997)报

道了2个兰芝山花岗岩的SHRIMP锆石U-Pb年龄分别为 $2\ 553 \pm 8\text{ Ma}$ 和 $2\ 537 \pm 10\text{ Ma}$ 。而Wilde等(2005)对五台地区花岗片麻岩较系统的年代学研究发现,TTG片麻岩的形成时代跨度为 $2\ 560\sim 2\ 515\text{ Ma}$,并可以进一步详细划为 $2\ 560\sim 2\ 540\text{ Ma}$ 和 $2\ 540\sim 2\ 515\text{ Ma}$ 两个阶段,但其时代却普遍较兰芝山花岗岩年轻。杨崇辉等(2015b)详细分析了华北克拉通新太古代晚期($2.56\sim 2.47\text{ Ga}$)花岗岩的时代、地球化学特征和构造动力学背景提出, $2.55\sim 2.52\text{ Ga}$ 主要为TTG岩浆活动,与俯冲岛弧环境有关; $2.52\sim 2.50\text{ Ga}$ 主要为钙碱性的花岗闪长岩和二长花岗岩,与挤压碰撞活动有关; $2.50\sim 2.47\text{ Ga}$ 主要形成钾质花岗岩,属于后造山岩浆活动。从目前的资料分析,兰芝山花岗岩时代较区域内TTG片麻岩更老,与华北克拉通新太古代晚期花岗岩的演化特征不一致。而较新的兰芝山花岗岩SHRIMP锆石U-Pb年龄结果为 $2\ 511\sim 2\ 502\text{ Ma}$ (杨崇辉等未发表资料)。因此,本文初步推断,四集庄组2个相对富钾的花岗岩砾石可能来自于兰芝山和峨口花岗片麻岩。

从花岗岩砾石的锆石Hf同位素分析,HT76-1砾石的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值基本位于0.75倍亏损地幔演化线之下,同时单阶段和两阶段模式年龄较锆石U-Pb年龄大 $100\sim 300\text{ Ma}$ (图7、表2),表明该花岗岩主要为2.8~2.6 Ga地壳再造。而HT76-2砾石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值变化范围较大,同时少部分锆石Hf模式年龄与U-Pb年龄接近(图7、表2),可能为新生地壳的部分熔融或有地幔物质的加入;而大部分锆石Hf模式年龄远大于其形成时代(图7、表2),反映了较老地壳的再造。正长花岗斑岩中,锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值远低于同期亏损地幔,且模式年龄多位于2.8~2.5 Ga的地壳演化线之间,表明五台地区古元古代中期主要为地壳再造(杜利林等, 2018)。结合已有的滹沱群花岗岩砾石锆石Hf同位素和新太古代晚期五台群中较广泛的基性火山岩,五台地区新太古代早期存在强烈的地壳生长,而新太古代晚期也有明显的地壳生长(杜利林等, 2013)。

6 滹沱群时代的再探讨

前述及,滹沱群作为华北克拉通最典型的古元古界地层已形成共识。早期的研究工作主要依据滹沱群中变质玄武岩的年代学资料,提出滹沱群的底界时代约为 2.5 Ga (伍家善等, 1986, 2008; 白

瑾, 1986; 王汝铮等, 1997)。之后, Wilde 等(2004)在青石村组凝灰岩中获得 $2\ 087 \pm 9$ Ma 的年龄结果, 首次提出滹沱群时代可能为古元古代中期, 较之前所认为的时代年轻约 300~400 Ma。近年来, 滹沱群底部四集庄组中酸性火山岩的年龄分别为 $2\ 140 \pm 14$ Ma(杜利林等, 2010)和 $2\ 121 \pm 10$ Ma(Peng et al., 2023); 同时, 滹沱群中不同层位的碎屑沉积岩中出现 $2.2 \sim 2.0$ Ga 碎屑锆石(杜利林等, 2011, 2015; Liu et al., 2011; Du et al., 2017)。这些研究成果指示, 滹沱群的初始沉积时代在 2.2 Ga 之后(杜利林等, 2010, 2011, 2015; Du et al., 2017)。然而, 根据现有的年龄结果, 似乎也有一些矛盾。杜利林等(2010)在七图村附近的四集庄组获得玄武安山岩的年龄为 $2\ 140 \pm 14$ Ma, Peng 等(2023)在东瓦厂村附近四集庄组发现薄层的长英质火山碎屑岩, 并获得锆石年龄结果为 $2\ 121 \pm 10$ Ma, 表明四集庄组沉积的时代为 $2.14 \sim 2.12$ Ga。杜利林等(2011, 2015)在五台七图村和上红表村附近的四集庄组变质砂岩中获得最年轻的碎屑锆石年龄组分别为 $2\ 137 \pm 31$ Ma 和 $2\ 133 \pm 6$ Ma; 同时, 杜利林等(2015)和 Peng 等(2023)在四集庄组不同分布区中识别出古元古代的花岗岩和火山砾石, 并获得砾石的年龄结果为 $2\ 166 \pm 17$ Ma, $2\ 138 \pm 17$ Ma 和 $2\ 150 \pm 27$ Ma。根据碎屑锆石和砾石年龄结果限定四集庄组时代应晚于 $2.14 \sim 2.13$ Ga。然而, 本次工作获得侵入于蒋村四集庄组的花岗斑岩时代为 $2\ 157 \pm 15$ Ma, 表明蒋村四集庄组沉积时代应早于 2.16 Ga, 与四集庄组中石英斑岩砾石($2\ 138 \pm 17$ Ma, 杜利林等, 2015)和火山岩($2\ 140 \pm 14$ Ma, 杜利林等, 2010; $2\ 121 \pm 10$ Ma, Peng et al., 2023)年龄结果出现矛盾。古元古代地层中, 这种时代相互矛盾的结果在辽河群中也较普遍存在:Luo 等(2004)在辽河群最下部浪子山组获得碎屑锆石年龄 $2.24 \sim 2.05$ Ga, 认为辽河群初始沉积时代晚于 2.05 Ga, 古元古代辽吉花岗岩为其提供了物源(路孝平等, 2004)。而杨崇辉等(2015b)在里尔峪组中获得黑云变粒岩(变质中酸性火山岩)的锆石年龄结果 $2\ 176 \pm 5$ Ma, 表明里尔峪组火山岩时代为约 2.18 Ga。此外, 野外可见 2.12 Ga 的基性岩墙侵入于辽河群中(Wang et al., 2016)。华北克拉通中部赞皇地区的甘陶河群南寺掌组底部砾岩中含有石英斑岩砾石, 这些石英斑岩为古元古代许亭花岗岩的边缘相, 表明甘陶河群初始沉积时代应晚于许亭花岗岩。然而, 许亭花岗岩时代($2\ 092 \sim 2\ 066$,

杨崇辉等, 2011; Du et al., 2016b)与甘陶河群南寺掌组($2\ 090 \sim 2\ 087$ Ma; Liu et al., 2012; 颜頫强等, 2013; Du et al., 2016a)近同时形成。这些古元古代地层中碎屑锆石、火山岩和侵入地层的地质体出现矛盾的结果, 很可能代表同一期岩浆事件的不同阶段, 而盆地沉积和岩浆活动属于同一期地质事件。根据华北克拉通 $2.2 \sim 2.0$ Ga 古元古代盆地沉积特征及岩浆事件构造属性综合分析, 该期地质事件形成于伸展的陆内裂谷环境, 岩浆热事件和同期沉积盆地的发育是同一地质事件的不同表现形式(Du et al., 2016b)。对于火山岩不发育的沉积盆地而言, 利用同期的岩浆事件持续的时限可间接限定盆地的发育时间。因此, 综合分析认为滹沱群初始沉积时代约为 2.2 Ga(杜利林等, 2010, 2011, 2015; Du et al., 2017)。近年来, 随着对五台地区高凡(亚)群的深入研究, 将其时代也归属于古元古代, 并限定在 $2\ 350 \sim 2\ 176$ Ma, 甚至年轻至 $2\ 125$ Ma(万渝生等, 2010, 2022; Liu et al., 2016; Peng et al., 2017, 2023)。野外地质关系和同位素年龄结果表明, 高凡群和五台群之间存在不整合(白瑾, 1986; 田永清, 1991; 万渝生等, 2010, 2022; Liu et al., 2016; Peng et al., 2017, 2023)。但滹沱群与高凡群之间的不整合特征较高凡群与五台群之间不整合特征更为明显(白瑾, 1986)。从目前的年代学资料分析, 高凡群与五台群之间的时代间隔却比滹沱群与高凡群之间更长。根据新获得的年代学数据(Peng et al., 2017, 2023; 万渝生等, 2022), 高凡群跨越了 $2.2 \sim 2.0$ Ga 的华北克拉通陆内裂谷伸展过程(Du et al., 2016b)。以滹沱群四集庄组不整合在高凡群之上的地质事实看, 高凡群的形成时代应该大于滹沱群四集庄组的形成年龄。但高凡群与滹沱群时代几乎是连续的, 且高凡群分布也十分局限, 其沉积的构造背景还不十分清楚。因此, 从地质事件的角度分析, 我们倾向于认为滹沱群初始沉积时代为 $2.2 \sim 2.18$ Ga。狭义的滹沱群应该仅包括豆村和东冶亚群(伍家善等, 2008; 杜利林等, 2011; Du et al., 2017), 其上限时代由于缺少可供定年的对象难以准确限定。一些学者根据碎屑锆石年龄和郭家寨群的时代认为滹沱群的上限为 $1\ 960$ Ma(Peng et al., 2023), 甚至 1.88 Ga 之后(Liu et al., 2011)。但从华北古元古代 $2.2 \sim 2.0$ Ga 和 2.0 Ga 之后地质事件的构造性质分析, 本文倾向于认为滹沱群的顶界年龄约为 2.0 Ga 更为合适(杜利林等, 2011; Du et al., 2017)。

al., 2017)。对于五台、高凡和滹沱群时序的进一步厘定,这些不同地质单元早期变质变形的精细研究和同位素年代学工作紧密结合,有望会获得新的突破。

7 初步结论

四集庄组正长花岗斑岩和似斑状二长花岗岩砾石中锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄结果分别为 $2\ 507\pm14\text{ Ma}$ 和 $2\ 519\pm35\text{ Ma}$,推断其可能源自于五台地区峨口花岗岩和兰芝山花岗岩。侵入于蒋村地区四集庄组的正长花岗斑岩锆石U-Pb年龄结果为 $2\ 157\pm15\text{ Ma}$,表明蒋村四集庄组沉积时代应大于 2.16 Ga 。结合华北克拉通古元古代中期 $2.2\sim2.0\text{ Ga}$ 地质事件构造性质和高凡群新的年代学资料,限定滹沱群的底界可能为 $2.2\sim2.18\text{ Ga}$,该套地层的沉积时限可能到约 2.0 Ga 结束。锆石Hf同位素结果指示,五台地区新太古代早期经历强烈的地壳增生,而新太古代晚期也有明显的地壳生长。

致谢 西北大学地质学系第五春荣教授在锆石U-Pb分析中提供了很大帮助;几位审稿专家从不同方面对文章初稿提出了很多修改建议,使文章质量得到提升;编辑部老师认真勘阅进一步完善了文章的表达。在此对各位专家和老师表示衷心感谢!

References

- Bai Jin. 1986. The Early Precambrian Geology of Wutaishan [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1~475 (in Chinese).
- Belousova E A, Kostitsyn Y A, Griffin W L, *et al.* 2010. The growth of the continental crust: Constraints from zircon Hf-isotope data [J]. *Lithos*, 119: 457~466.
- Blichert-Toft J, Chauvel C and Albarède F. 1997. Separation of Hf and Lu for high-precision isotope analysis of rock samples by magnetic sector-multiple collector ICP-MS [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127: 248~260.
- Chen Y J, Chen W Y, Li Q G, *et al.* 2019. Discovery of the Huronian glaciation event in China: Evidence from glaciogenic diamictites in the Hutuo Group in Wutai Shan [J]. *Precambrian Research*, 320: 1~12.
- Chen Weiyu, Chen Yanjing, Li Qiugen, *et al.* 2018. Detrital zircon U-Pb ages of the Sijizhuang glacial diamictites of the Hutuo Group in Wutai Shan, Shanxi Province and implication for the Great Oxidation Event [J]. *Earth Science Frontiers*, 25(5): 1~18 (in Chinese with English abstract).
- Diwu C R, Sun Y, Guo A L, *et al.* 2011. Crustal growth in the North China Craton at $\sim2.5\text{ Ga}$: Evidence from in situ zircon U-Pb ages, Hf isotopes and whole-rock geochemistry of the Dengfeng Complex [J]. *Gondwana Research*, 20(1): 149~170.
- Diwu C R, Sun Y, Zhao Y, *et al.* 2014. Early Paleoproterozoic ($2.45\sim2.2\text{ Ga}$) magmatic activity during the period of global magmatic shutdown: Implications for the crustal evolution of the southern North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 255: 627~640.
- Du Lilin, Yang Chonghui, Guo Jinghui, *et al.* 2010. The age of the base of the Paleoproterozoic Hutuo Group in the Wutai Mountains area, North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating of basaltic andesite [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(17): 1 782~1 789.
- Du Lilin, Yang Chonghui, Lu Zenglong, *et al.* 2015. The Sijizhuang Formation at Jiangcun area of Wutai Mountains: Further constraints on the age of the Hutuo Group [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(5): 599~612 (in Chinese with English abstract).
- Du Lilin, Yang Chonghui, Ren Liudong, *et al.* 2009. Petrology, geochemistry and petrogenesis of the metabasalts of the Hutuo Group, Wutai Mountains, Shanxi, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 28(7): 867~876 (in Chinese with English abstract).
- Du Lilin, Yang Chonghui, Song Huixia, *et al.* 2018. Petrogenesis and tectonic setting of $2.2\sim2.1\text{ Ga}$ granites in Wutai area, North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(4): 1 154~1 174 (in Chinese with English abstract).
- Du Lilin, Yang Chonghui, Wang Wei, *et al.* 2011. The reexamination of the age and stratigraphic subdivision of the Hutuo Group in the Wutai Mountains area, North China Craton: Evidences from geology and zircon U-Pb geochronology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1 037~1 055 (in Chinese with English abstract).
- Du L L, Yang C H, Wang W, *et al.* 2012. Provenance of the Paleoproterozoic Hutuo Group basal conglomerates and Neoarchean crustal growth in the Wutai Mountains, North China Craton: Evidence from granite and quartzite pebble zircon U-Pb ages and Hf isotopes [J]. *Science China: Earth Sciences*, 55(11): 1 796~1 814.
- Du L L, Yang C H, Wang W, *et al.* 2013. Paleoproterozoic rifting of the North China Craton: Geochemical and zircon Hf isotopic evidence from the 2.137 Ma Huangjinsan A-type granite porphyry in the Wutai area [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 190~202.

- Du L L, Yang C H, Wyman D A, et al. 2015. Petrogenesis and tectonic implications of the iron-rich tholeiitic basalts in the Hutuo Group of the Wutai Mountains, central Trans-North China Orogen[J]. *Precambrian Research*, 271: 225~242.
- Du L L, Yang C H, Wyman D A, et al. 2016a. Age and depositional setting of the Paleoproterozoic Gantaohe Group in Zanhuan Complex: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes of sandstones and dacite[J]. *Precambrian Research*, 286: 59~100.
- Du L L, Yang C H, Wyman D A, et al. 2016b. 2090-2070 Ma A-type granitoids in Zanhuan Complex: Further evidence on a Paleoproterozoic rift-related tectonic regime in the Trans-North China Orogen[J]. *Lithos*, 254~255: 18~35.
- Du L L, Yang C H, Wyman D A, et al. 2017. Zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotope compositions from clastic rocks in the Hutuo Group: Further constraints on Paleoproterozoic tectonic evolution of the Trans-North China Orogen[J]. *Precambrian Research*, 303: 291~314.
- Fisher C M, Vervoort J D and Hanchar J M. 2014. Guidelines for reporting zircon Hf isotopic data by LA-MC-ICPMS and potential pitfalls in the interpretation of these data[J]. *Chemical Geology*, 363: 125~133.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64 (1): 133~147.
- Guo Jingjing, Ren Liudong and Bai Jin. 2011. Analysis of the sedimentary setting of the Paleoproterozoic Hutuo Group in the Wutaishan area: Foreland basin or intracontinental rift basin[J]? *Earth Science Frontiers*, 18(3): 211~220 (in Chinese with English abstract).
- Hu Z C, Liu Y S, Gao S, et al. 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and Jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27: 1 391~1 399.
- Hu Z C, Zhang W, Liu Y S, et al. 2015. "Wave" Signal-Smoothing and Mercury-Removing Device for Laser Ablation Quadrupole and Multiple Collector ICPMS Analysis: Application to Lead Isotope Analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 87(2): 1 152~1 157.
- Kong Fanfan, Yuan Xunlai and Zhou Chuanming. 2011. Paleoproterozoic glaciation: Evidence from carbon isotope record of the Hutuo Group, Wutai Mountains area of Shanxi Province, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(27): 2 922~2 930.
- Li Huaikun, Su Wenbo, Zhou Hongying, et al. 2011. The base age of the Changchenian System at the northern North China Craton Should be younger than 1670 Ma: Constraints from zircon U-Pb LA-MC-ICPMS dating of a granite-porphyry dike in Miyun County, Beijing [J]. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 108~120 (in Chinese with English abstract).
- Liu C H, Liu F L, Shi J R, et al. 2016. Depositional age and provenance of the Wutai Group: Evidence from zircon U-Pb and Lu-Hf isotopes and whole-rock geochemistry[J]. *Precambrian Research*, 281: 269~290.
- Liu C H, Zhao G C, Liu F L, et al. 2012. Zircons U-Pb and Lu-Hf isotopic and whole-rock geochemical constraints on the Gantaohe Group in the Zanhuan Complex: Implications for the tectonic evolution of the Trans-North China Orogen [J]. *Lithos*, 146~147: 80~92.
- Liu C H, Zhao G C, Sun M, et al. 2011. U-Pb and Hf isotopic study of detrital zircons from the Hutuo group in the Trans-North China Orogen and tectonic implications[J]. *Gondwana Research*, 20: 106~121.
- Liu D Y, Page R W, Compston W, et al. 1985. U-Pb zircon geochronology of late Archean metamorphic rocks in the Taihangshan-Wutaishan area, North China[J]. *Precambrian Research*, 27: 85~109.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 51(1~2): 537~571.
- Lu Xiaoping, Wu Fuyuan, Zhang Yanbin, et al. 2004. Emplacement age and tectonic setting of the Paleoproterozoic Liaoji granites in Tonghua area, southern Jilin Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 381~392 (in Chinese with English abstract).
- Luo Y, Sun M, Zhao G C, et al. 2004. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton: Constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt[J]. *Precambrian Research*, 134: 349~371.
- Ludwig K R. 2001. Squid 1.02: A User's Manual[C]//Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 2. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 1~19.
- Mao M X, Liou P, Guo J H, et al. 2023. Petrogenesis of 2.7~2.65 Ga TTGs in the Wutai Complex: Constraints on the Neoarchean crustal evolution of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, under review.
- Miao Peisen, Zhang Zhenfu, Zhang Jianzhong, et al. 1999. Paleoproterozoic stratigraphic sequence in the Wutai Mountain area[J]. *Regional Geology of China*, 18(4): 405~413 (in Chinese with English abstract).
- Ouyang G, She Z B, Dapineau D, et al. 2020. Dynamic carbon and sul-

- fur cycling in the aftermath of the Lomagundi-Jatuli Event: Evidence from the Paleoproterozoic Hutuo Supergroup, North China Craton[J]. Precambrian Research, 337: 105549.
- Ouyang G, She Z B, Xiao Q, et al. 2023. Reappearance of Precipitated aragonite crystal fans as evidence for expansion of oceanic dissolved inorganic carbon reservoir in the aftermath of the Lomagundi-Jatuli Event[J/OL]. Geological Society of America Bulletin, doi. org/10.1130/B36499.1.
- Peng P, Feng L J, Sun F B, et al. 2017. Dating the Gaofan and Hutuo Groups—Targets to investigate the Paleoproterozoic Great Oxidation Event in North China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 138: 535~547.
- Peng P, Liu X, Feng L J, et al. 2023. Rhyacian intermittent large igneous provinces sustained Great Oxidation Event: Evidence from North China Craton[J]. Earth-Science Reviews, 238: 104352.
- She Z B, Yang F Y, Liu W, et al. 2016. The termination and aftermath of the Lomagundi-Jatuli carbon isotope excursions in the Paleoproterozoic Hutuo Group, North China[J]. Journal of Earth Science, 27(2): 297~316.
- Tian Yongqing. 1991. Geology and Gold Mineralization of Wutaishan-Hengshan Greenstone Belt[M]. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press, 1~475 (in Chinese).
- Vervoort J D, Patchett P J, Albarede F, et al. 2000. Hf-Nd isotopic evolution of the lower crust[J]. Earth and Planetary Sciences Letters, 181: 115~129.
- Wan Yusheng, Dong Chunyan, Li Pengchuan, et al. 2022. Formation age of the Gaofan Group in Wutai area: New evidence from SHRIMP U-Pb zircon dating[J]. Earth Science Frontiers, 29(2): 45~55 (in Chinese with English abstract).
- Wan Yusheng, Miao Peisen, Liu Dunyi, et al. 2010. Formation ages and source regions of the Paleoproterozoic Gaofan, Hutuo and Dongjiao Groups in the Wutai and Dongjiao areas of the North China Craton from SHRIMP U-Pb dating of detrital zircons: Resolution of debates over their stratigraphic relationships[J]. Chinese Science Bulletin, 55(13): 1 278~1 284.
- Wang Ruzheng, Yan Yaoyang, Li Huimin, et al. 1997. The Early Precambrian chronotectonic framework in the Wutaishan area, Shanxi [J]. Progress in Precambrian Research, 20(2): 44~50 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wei, Yang Enxiu, Wang Shijin, et al. 2009. Petrography of the Metamorphic pillow basalt and SHRIMP U-Pb dating of zircon from the intruding trondhjemite in Archean Taishan “Group”, Western Shandong[J]. Geological Review, 55(5): 737~745 (in Chinese with English abstract).
- Wang X P, Peng P, Wang C, et al. 2016. Petrogenesis of the 2115 Ma Haicheng mafic sills from the Eastern North China Craton: Implications for an intra-continental rifting[J]. Gondwana Research, 39: 347~364.
- Wang Z H, Wilde S A, Wang Kaiyi, et al. 2004. A MORB-arc basalt-adakite association in the 2.5 Ga Wutai greenstone belt: Late Archean magmatism and crustal growth in the North China Craton[J]. Precambrian Research, 131: 323~343.
- Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, et al. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. Geostandards Newsletter, 19(1): 1~23.
- Wilde S A, Cawood P A and Wang K Y. 1997. The relationship and timing of granitoid evolution with respect to felsic volcanism in the Wutai Complex, North China Craton[C]//Proceedings of the 30th International Geological Congress. Beijing, vol. 17. VSP International Science Publishers, Amsterdam, 75~87.
- Wilde S A, Cawood P A, Wang K Y, et al. 2005. Granitoid evolution in the late Archean Wutai Complex, North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 24: 597~613.
- Wilde S A, Zhao G C, Wang K Y, et al. 2004. First SHRIMP zircon U-Pb ages for Hutuo Group in Wutaishan: Further evidence for Palaeoproterozoic amalgamation of North China Craton[J]. Chinese Science Bulletin, 49(1): 83~90.
- Wu Jiashan, Liu Dunyi and Geng Yuansheng. 2008. Integrated research report on the establishment Paleoproterozoic Hutuo Group of China-Geochronological framework of Hutuo group and sequences of major geological events[C]//Research Report on the Establishment of Major Stratigraphical Stages in China (2001~2005). Beijing: Geological Publishing House, 534~544 (in Chinese).
- Wu Jiashan, Liu Dunyi and Jin Longguo. 1986. The zircon U-Pb age of metamorphosed basic volcanic lavas from the Hutuo Group in the Wutai Mountain area, Shanxi Province[J]. Geological Review, 32(2): 178~185 (in Chinese with English abstract).
- Xie Hangjiang, Liu Dunyi, Yin Xiaoyan, et al. 2012. Formation age and tectonic environment of the Gantaohé Group, North China Craton: Geology, geochemistry, SHRIMP zircon geochronology and Hf-Nd isotopic systematics[J]. Chinese Science Bulletin, 57(36): 4 735~4 745.
- Yang Chonghui, Du Lilin, Ren Liudong, et al. 2011. The age and petrogenesis of the Xuting granite in the Zanhuang Complex, Hebei Prov-

- ince: Constraints on the structural evolution of the Trans-North China Orogen, North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1 003~1 016 (in Chinese with English abstract).
- Yang Chonghui, Du Lilin, Ren Liudong, et al. 2015a. The age and tectonic setting of metavolcanic rocks in the Tongkuangyu deposit, Zhongtiao Mountain, and their constraints on copper mineralization [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(5): 613~633 (in Chinese with English abstract).
- Yang Chonghui, Du Lilin, Ren Liudong, et al. 2015b. Early Precambrian Stratigraphic Division and Magmatic Evolution in the North China Craton [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Zhang J, Zhao G C, Li S Z, et al. 2006. U-Pb zircon dating of the granitic conglomerates of the Hutuo Group: Affinities to the Wutai granitoids and significance to the tectonic evolution of the Trans-North China Orogen [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 886~898.
- Zhang Xuping and Geng Wei. 2016. The geological features and tectonic significances of the Wangjiahui rock in Wutai Mountains, Shanxi [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 47(6): 779~785 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 白瑾. 1986. 五台山早前寒武纪地质 [M]. 天津: 天津科技出版社, 1~475.
- 陈威宇, 陈衍景, 李秋根, 等. 2018. 山西五台山滹沱群四集庄冰碛岩碎屑锆石年龄及对大氧化事件研究意义 [J]. 地学前缘, 25(5): 1~18.
- 杜利林, 杨崇辉, 郭敬辉, 等. 2010. 五台地区滹沱群底界时代: 玄武安山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年 [J]. 科学通报, 55(3): 246~254.
- 杜利林, 杨崇辉, 路增龙, 等. 2015. 五台山蒋村地区四集庄组——对滹沱群时代的再限定 [J]. 地球学报, 36(5): 599~612.
- 杜利林, 杨崇辉, 任留东, 等. 2009. 山西五台山区滹沱群变质玄武岩岩石学、地球化学特征及其成因意义 [J]. 地质通报, 28(7): 867~876.
- 杜利林, 杨崇辉, 宋会侠, 等. 2018. 华北克拉通五台地区 2.2~2.1 Ga 花岗岩的成因与构造背景 [J]. 岩石学报, 34(4): 1 154~1 174.
- 杜利林, 杨崇辉, 王伟, 等. 2011. 五台地区滹沱群时代与地层划分新认识: 地质学与锆石年代学证据 [J]. 岩石学报, 27(4): 1 037~1 055.
- 杜利林, 杨崇辉, 王伟, 等. 2013. 五台地区滹沱群砾岩物质源区及新太古代地壳生长: 花岗岩和石英岩砾石锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素制约 [J]. 中国科学: 地球科学, 43(1): 81~96.
- 郭进京, 任留东, 白瑾. 2011. 五台山地区古元古界滹沱群沉积环境: 前陆盆地还是陆内裂谷盆地? [J]. 地学前缘, 18(3): 211~220.
- 孔凡凡, 袁训来, 周传明. 2011. 古元古代冰期事件: 山西五台地区滹沱群的碳同位素证据 [J]. 科学通报, 56(32): 2 699~2 707.
- 李怀坤, 苏文博, 周红英, 等. 2011. 华北克拉通北部长城系底界年龄小于 1670 Ma: 来自背景密云花岗斑岩岩脉锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 年龄的约束 [J]. 地学前缘, 18(3): 108~120.
- 陆孝平, 吴福元, 张艳斌, 等. 2004. 吉林南部通化地区古元古代辽吉花岗岩的侵位年代与形成构造背景 [J]. 岩石学报, 20(3): 381~392.
- 苗培森, 张振福, 张建中, 等. 1999. 五台山区早元古代地层层序探讨 [J]. 中国区域地质, 18(4): 405~413.
- 田永清. 1991. 五台山-恒山绿岩带地质及金的成矿作用 [M]. 太原: 山西科技出版社, 1~244.
- 万渝生, 董春艳, 李鹏川, 等. 2022. 五台地区高凡群形成时代新证据: 锆石 SHRIMP U-Pb 定年 [J]. 地学前缘, 29(2): 45~55.
- 万渝生, 苗培森, 刘敦一, 等. 2010. 华北克拉通高凡群、滹沱群和东焦群的形成时代和物质来源: 碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年代学制约 [J]. 科学通报, 55(7): 572~578.
- 王汝铮, 颜耀阳, 李惠民, 等. 1997. 山西五台山地区早前寒武纪年代构造格架 [J]. 前寒武纪研究进展, 20(2): 44~50.
- 王伟, 杨恩秀, 王世进, 等. 2009. 鲁西泰山岩群变质枕状玄武岩相学和侵入的奥长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学 [J]. 地质论评, 55(5): 737~745.
- 伍家善, 刘敦一, 耿元生. 2008. 中国古元古界滹沱群建系综合研究报告——滹沱群地质年代格架和重大地质事件序列 [C]//中国主要断代地层建阶研究报告(2001~2005). 北京: 地质出版社, 534~544.
- 伍家善, 刘敦一, 金龙国. 1986. 五台山区滹沱群变质基性熔岩中锆石 U-Pb 年龄 [J]. 地质论评, 32(2): 178~185.
- 颉颃强, 刘敦一, 殷小艳, 等. 2013. 甘陶河群形成时代和构造环境: 地质、地球化学和锆石 SHRIMP 定年 [J]. 科学通报, 58(1): 75~85.
- 杨崇辉, 杜利林, 任留东, 等. 2011. 河北赞皇地区许亭花岗岩的时代及成因: 对华北克拉通中部带构造演化的制约 [J]. 岩石学报, 27(4): 1 003~1 016.
- 杨崇辉, 杜利林, 任留东, 等. 2015a. 中条山铜矿峪变质火山岩的时代、构造背景及对成矿的制约 [J]. 地球学报, 36(5): 613~633.
- 杨崇辉, 杜利林, 任留东, 等. 2015b. 华北克拉通早前寒武纪地层划分对比及岩浆演化 [M]. 北京: 科学出版社.
- 张许平, 耿威. 2016. 山西五台山王家会岩体的地质特征及构造意义 [J]. 太原理工大学学报, 47(6): 779~785.