

冀西北中山沟金矿区泥盆世 A-型碱性杂岩侵位时代、岩石地球化学以及地质意义*

王丰翔^{1,2,3}, 陈超^{1**}, 张福祥¹, 于灵艳⁴, 冯云磊¹, 马奎¹, 王云静¹

(1 河北省战略性关键矿产资源重点实验室 河北地质大学地球科学学院, 河北 石家庄 050031; 2 内蒙古自治区岩浆活动成矿与找矿重点实验室 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 3 中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 4 河北地质大学华信学院, 河北 石家庄 050031)

摘要 中山沟金矿床是产出在冀北水泉沟碱性杂岩体西段的一处中型金矿床, 受区域 E-W 向深大断裂控制。文章对矿区的碱性侵入岩体开展了年代学和岩体地球化学研究。LA-MC-ICP-MS 锆石测年结果表明, 矿区新鲜角闪石英二长岩与蚀变角闪石英二长岩样品的锆石谐和年龄分别为(390±2)Ma 和(392±3)Ma, 均为泥盆世。锆石稀土元素总量相对较高, 轻稀土元素相对亏损, 重稀土元素则相对富集, 并伴随着中等-强烈的 Ce 异常和不明显的 Eu 异常。2 件样品锆石的 ¹⁷⁸Lu/¹⁷⁷Hf 比值相对均一, ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值呈现低值且变化浮动小, 二阶段 Hf 模式年龄平均值为 2424 Ma 和 2465 Ma。研究区侵入岩全岩分析显示其均为富 SiO₂、富碱、准铝的钙碱性岩石, 为高钾钙碱性 A2-型花岗岩, 具有 LREE、LILE 元素(Sr、Rb、Ba)富集和高场强元素(Nb、Ta、Hf)、放射性元素(Th、U)、HREE 和 Ti 相对亏损特征, 稀土元素总量较低且变化范围较大, 显示了右倾的稀土元素配分模式, 并伴随着弱负-正 Eu 异常, 相对富集轻稀土元素, 亏损重稀土元素。岩体源区可能较老(太古代桑干群), 可能为榴辉岩或角闪榴辉岩相, 并含有一定量的富集地幔的物质。年代学和岩石学特征表明, 碱性岩浆的侵位可能为西伯利亚板块和华北克拉通微地块发生碰撞后伸展的产物, 是区域拉张构造背景下岩浆活动的产物。

关键词 地球化学; 锆石 LA-MC-ICP-MS 测年; Hf 同位素; A2-型花岗岩; 碱性岩; 金矿床; 华北克拉通北缘
中图分类号: P618.51 **文献标志码**: A

Emplacement age, petrogeochemistry and geological significance of Devonian A-type alkaline complex in Zhongshangou Au deposit, northwest Hebei Province

WANG FengXiang^{1,2,3}, CHEN Chao¹, ZHANG FuXiang¹, YU LingYan⁴, FENG YunLei¹,
MA Kui¹ and WANG YunJing¹

(1 Key Laboratory of Regional Geology and Mineralization, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 2 Inner Mongolia Key Laboratory of Magmatic Mineralization and Ore-Prospecting, Geological Survey Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China; 3 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4 Huaxin College, HeBei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China)

Abstract

The Zhongshangou Au deposit, located in the west section of the Shuiquangou alkaline complex, northern Hebei Province, is a vein-type mineralization and is obviously controlled by near E-W trending regional deep

* 本文得到河北省自然科学基金面上项目(编号: D2019403015)、河北省青年科学基金项目(编号: D2020403101)、河北省高等学校科学技术研究项目(编号: ZD2019003)、河北省“三三三人才工程”项目(编号: A202001014)和河北地质矿产勘查开发局科研项目(编号: 13000022P00329410103R)联合资助

第一作者简介 王丰翔, 男, 1984 年生, 助理研究员, 从事大型-超大型矿床研究。Email: wfx0316@163.com

** 通讯作者 陈超, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 主要从事构造地质学与构造控矿的教学与科研工作。Email: goldcc@163.com

收稿日期 2021-06-13; 改回日期 2021-10-30。孟秋熠编辑。

faults. This paper summarizes the study on geochronology and geochemistry of the main intrusive rocks from the Zhongshangou Au deposit. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating yielded a concordia age of $(390\pm 2)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.026$) and $(392\pm 3)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.016$) for fresh and altered amphibolite monzonite, respectively, indicating the emplacement age of the intrusive rocks is constrained in Early Devonian. The whole rock geochemistry show that the intrusive rocks from the Zhongshangou Au deposit are characterized by high SiO_2 , alkali-rich, meta-/ per-aluminum, which belongs to calc-alkaline A2-type granite, characterized by LREE and LILE (large ion lithophile elements) enrichment, HFSE (e.g. Nb, Ta, Hf), HREE and radioactive elements (Th, U) depletion and Ti slight depletion, accompanied by slight negative or weak positive Eu anomaly. The source area of the intrusive rocks may be old (Archean Sanggan Group), and may be eclogite or hornblende eclogite facies, contains a certain amount of enriched mantle material. The geochronological and petrological characteristics indicate that the emplacement of alkaline magma may be the product of extension after the collision between the Siberian Plate and a micro-block of the North China Craton, and it is the product of magmatic activity under the regional extensional setting.

Key words: geochemistry, zircon LA-MC-ICP-MS dating, Hf isotope, A2-type granite, alkaline rock, gold deposit, North margin of the North China Craton

全球>20%的大型-超大型铜-金(钼)矿床与碱性岩浆有关,该类矿床具有规模大、品位高、贫硫化物和对环境破坏小等特点,成为世界金、铜、钼开发利用的重要对象(Bonha et al., 1983; Mutschle et al., 1984; Muller et al., 1993; Richards, 1995; Jensen et al., 2000; 聂凤军等, 1997; 2014; 王丰翔等, 2017)。因此,寻找碱性岩省成为寻找该类矿床的重要靶区。就中国而言,在华北克拉通北部及邻区发现和圈定富碱-碱性侵入岩体近百处,找矿潜力巨大(聂凤军等, 2014)。截止目前,在该区域圈定与碱性岩体有关的铜-金矿集区有赛马-柏林川、河坎子-安子岭、哈达门沟-包头东以及水泉沟-后沟岩体(图 1a)。本次研究的碱性杂岩体所在的中山沟金矿床,便是水泉沟-后沟碱性杂岩体内产出的金矿床(图 1a~c)。

关于中山沟及邻区金矿的成因研究,目前主要存在以下 5 种争议:① 与侵入岩有关的碲-金矿床;② 与岩浆活动有关的热液裂隙充填脉型矿床;③ 混合岩化热液成因;④ 浅成中低温热液矿床;⑤ 早白垩世造山型金矿(李昌存等, 1999; 水兰素, 2002; 吴珊珊等, 2009; 邓晋福等, 2009; 王宝德等, 2010; 查钟健, 2020; 甄世民等, 2021; Fan et al., 2021)。显然,多数学者认为金成矿与水泉沟碱性杂岩体有着密切的成因联系,区域内金矿化的热源与碱性岩体的演化有关,并将其划分为与碱性岩体有关的金矿床(宋官祥等, 1991; 王郁等, 1994; 宋瑞先等, 2013)、碱性岩体有关的改造热液型金矿(宋瑞国等, 1996; 江思宏等, 2000; 包志伟等, 2000)和与地幔热柱多级演化有关的金矿床(王宝德等, 2010; 牛树银等, 2011)。

然而,矿区碱性杂岩体的研究相对比较薄弱。尽管前人对区域水泉沟-后沟岩体做了精致的研究,其成果如下:① 岩体侵位年龄跨度大,获得精确的 U-Pb 年龄为 372~412 Ma(胡小蝶等, 1997; 陆松年等, 1997; 江思宏等, 2000; 罗镇宽等, 2001; 李长民等, 2010, 2014; Bao et al., 2014);② 岩体成因主要有 3 种观点:以幔源为主的岩浆成因(王蓉嵘, 1992; 宋国瑞等, 1994; 王宝德等, 2010);以壳-幔混合的重熔(同熔)成因(王正坤等, 1992; 包志伟等, 1996; 2003; 2006; 张招崇, 1997; 李长民, 1999; 2014; 江思宏等, 2003; Jiang et al., 2005);以壳源为主的混合岩化-重熔(交代)成因(许云程等, 1994; 宋瑞先等, 2013)。

从区域地壳演化与地球动力学研究角度,将华北克拉通北缘张裂构造环境内产出的碱性和富碱性侵入岩体看作为一种特殊的“岩石探针”。本文通过对中山沟金矿区的碱性杂岩开展 LA-MC-ICP-MS 锆石测年、Hf 同位素和岩体地球化学研究,一方面通过对岩浆岩的精确测年,从而查明矿区碱性岩浆活动的时间,以及大致限定中山沟金矿床的成矿时代;另一方面,通过对矿区碱性岩浆岩地球化学研究,揭示其源区、动力机制,并初步讨论碱性岩浆活动与金成矿作用的成因联系,以期为区域找矿勘查工作的部署提供理论依据。

1 地质概况

中山沟金矿位于河北省张家口西南约 70 km,中心地理坐标 $115^{\circ}05'33''\text{E}$, $40^{\circ}54'302''\text{N}$ (图 1a)。就

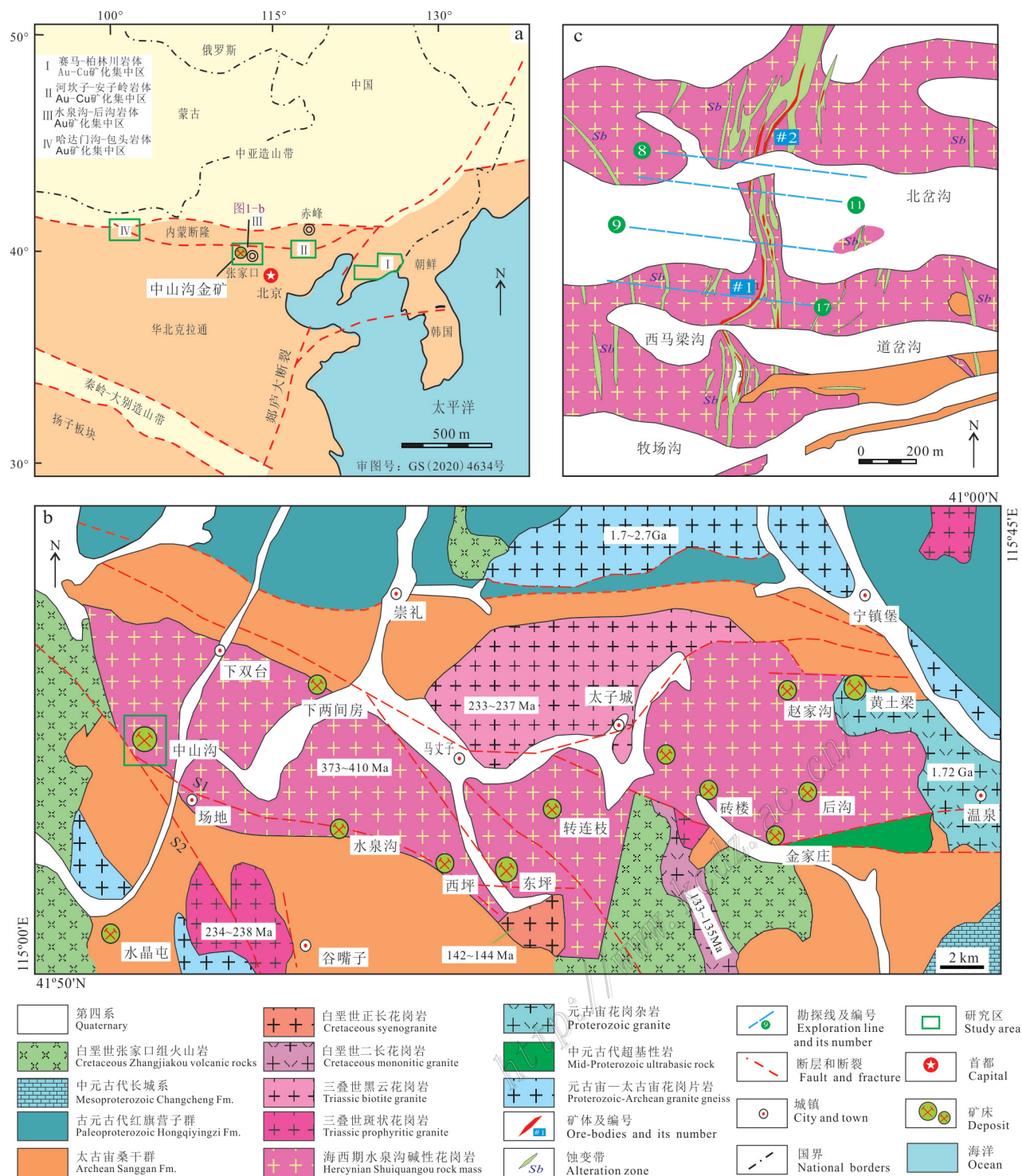


图 1 中国东部地质简图(a, 据 Kusky et al., 2003; 王丰翔等, 2016 修编)、冀西北水泉沟地区区域地质图(b, 据 Gao et al., 2017; Bao et al., 2016 修编)和中山沟金矿矿区地质图(c, 河北地矿三队, 1989; 1990)

Fig. 1 Tectonic setting of eastern China (a, modified after Kusky et al., 2003; Wang et al., 2016); regional setting of the Shuiquangou area, northwestern Hebei (b, modified after Gao et al., 2017; Bao et al., 2016) and geological map of the Zhongshangou gold deposit (c, after The 3rd Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology, 1989; 1990)

大地构造而言,研究区位于华北克拉通北缘中段,内蒙断隆与燕山断陷的分界线之南侧(图 1a、b)。区域

上出露的地层有太古宙桑干群(角闪岩相的片麻岩、混合岩和麻粒岩)、下元古界红旗营子群变质岩系

和中元古界长城系浅变质海相沉积碎屑岩系,以及白垩世中酸性火山岩(张家口组)和第四系(图1b;河北地矿三队,1989;1990;宋瑞先等,2013;陈超等,2021)。区域地层主要受EW向的尚义-崇礼深大断裂所控制,并叠加有NNE-NE向及NW向断裂(图1b)。

区域岩浆活动贯穿于从前寒武纪经古生代到中生代地壳演化的全部过程,以铁镁质和花岗质岩浆侵入活动为主。其中,前寒武纪的代表性岩体主要有元古宙—太古宙片麻状花岗岩体(1.7~2.7 Ga)、和元古宙温泉斑状花岗岩体(~1.7 Ga)和镁铁质岩体(图1b; Miao et al., 2002; Jiang et al., 2007; 李长民等,2014; Bao et al., 2016; 课题组,未发表)。古生代

以来的岩浆侵入主要受E-W向构造控制。海西期则以水泉沟碱性花岗杂岩体(373~410 Ma)为代表,出露面积为340 km²,与区域金矿床在空间上有密切空间联系(图1b);中生代岩体以岩株、岩墙为主,主要有三叠世黑云花岗岩(233~237 Ma)、斑状花岗岩(234~238 Ma)、白垩世正长花岗岩(142~144 Ma)和二长花岗岩(133~135 Ma)。其中,水泉沟碱性花岗杂岩为中山沟金(钼)矿床的主要赋矿围岩,岩石类型主要有辉石闪长岩、角闪二长岩、正长岩,成岩时代为373~410 Ma(图1b; 陆松年等,1997; 胡小蝶等1998; 罗镇宽等,2001; 李长民等,1999; 2014; Bao et al., 2016; 课题组,未发表)。

矿区共探明>40条矿化体,呈脉群或脉带产出,

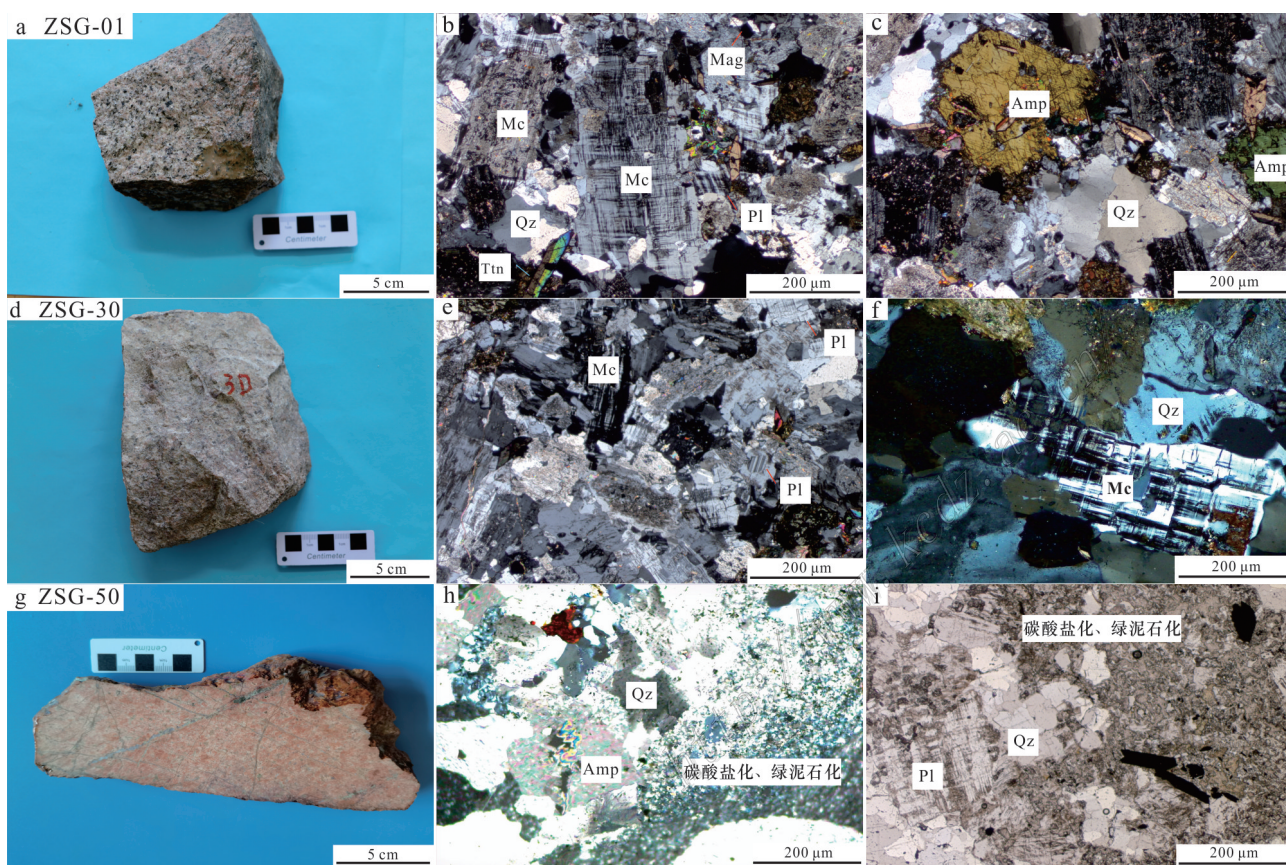


图2 中山沟金矿区典型侵入体照片和显微照片

a~c. 样品 ZSG-01: 新鲜的中粗粒的角闪石英二长岩, 主要由斜长石(Pl)、微斜长石(Mc)、石英(Qz)和角闪石(Amp)组成, 并含有少量榍石(Ttn)和磁铁矿(Mag); d~f. 新鲜中细粒石英二长岩, 由斜长石(Pl)、微斜长石(Mc)和石英(Qz)组成; g~i. 蚀变角闪石英二长岩, 角闪石(Amp)和微斜长石(Mc)基本发生碳酸盐化、绢云母化和绿泥石化, 局部可见石英(Qz)增大

Fig.2 Photographs and photomicrographs of intrusive rocks from the Zhongshangou Au deposit

a~c. Sample ZSG-01: fresh medium-coarse grained amphibole-quartz monzonite, mainly comprising plagioclase(Pl), microcline (Mc), quartz(Qz) and amphibole (Amp) and contains a small amount of titanite (Ttn) and magnetite (Mag); d~f. Sample ZSG-30: fresh medium-fine grained quartz monzonite, mainly comprising plagioclase(Pl), microcline (Mc), and quartz(Qz); g~i. altered amphibole-quartz monzonite, microcline (Mc) and amphibole (Amp) are basically altered into carbonate, chlorite and muscovite; Quartz(Qz) enlargement can be seen locally

主要寄宿在水泉沟二长杂岩体的内接触带,主要岩性为角闪石英二长岩和石英二长岩(图 2a~i)。岩石受构造活动常形成碎裂岩,局部形成角砾岩和糜棱岩。

矿体主要寄宿在蚀变的碱性杂岩内,呈脉群或脉带产出(图 3a),且具有一定的分带性,主要由绿化带、钾化带、高硅-泥质蚀变带和碳酸盐化带。根据蚀变-矿化体的切割关系、矿石结构构造、矿物组合及共生关系,成岩成矿阶段可划分 2 期 4 阶段,分别为热液期(钾化-贫硫化物阶段、乳白色石英-贫硫化物阶段、强硅化-硫化物阶段和碳酸盐化阶段)和表生期。

其中,矿石矿物主要有硫化物(黄铁矿、方铅矿、黄铜矿、闪锌矿、辉钼矿)和贵金属矿物(自然金、碲金银矿和碲银矿),载金矿物主要为黄铁矿(图 3b~d)。

2 样品采集和测试方法

2.1 样品采集

ZSG-01 和 ZSG-2 号样品均采自中山沟金矿区道岔沟北坡,为新鲜的岩体样品(图 1c)。根据野外及镜下特征观察,本文将其岩性定为粗粒角闪石英二长岩。岩石呈肉红色,花岗结构,交代结构,主要由微斜条纹长石(~75%)、更长石(~10%)、角闪石

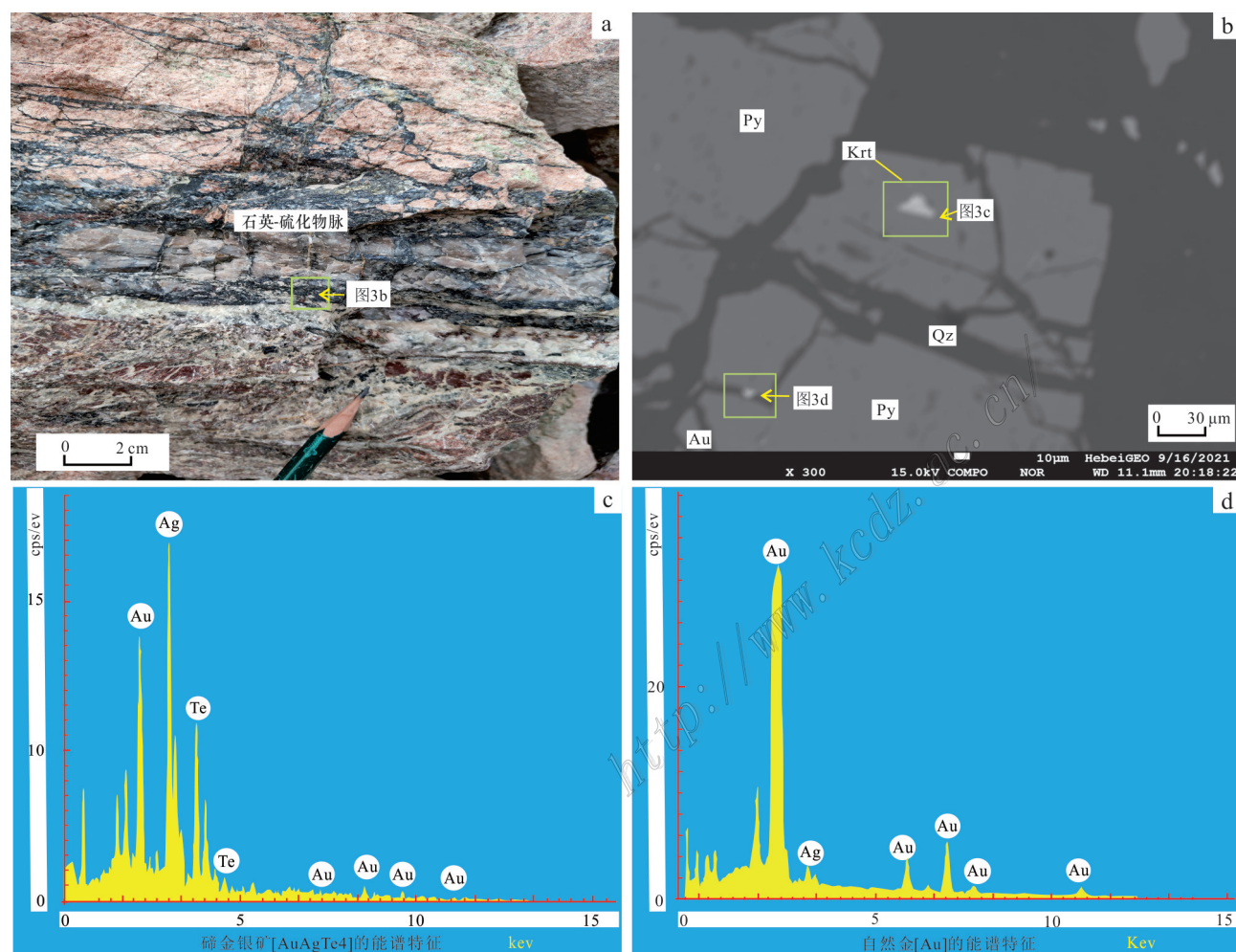


图 3 细脉-脉型矿石照片,扫描电镜及能谱图研究区位置

a. 细脉-脉型矿石照片;b. 扫描电镜(SEM)图像显示主要载金矿物:黄铁矿(Py)和贵金属矿物:自然金(Au)和碲金银矿(Krt);
c、d. 扫描电镜能谱图

Fig 3 The photographs and scanning electron microscopy (SEM) image

a. vein-type and stringers ores; b. scanning electron microscope (SEM) image : Pyrite (Py) and precious metals: Native gold (Au) and krennerite (Krt); c, d. SEM energy spectrum

(~5%)、石英和副矿物组成(磁铁矿、磷灰石、榍石)组成(图2)。

样品 ZSG-30 和 ZSG-31 均采自中山沟金矿区#2 脉与#1 矿脉衔接部位(井下4中段)。定名为石英二长岩。根据镜下特征,笔者将其定名为中粒石英二长岩,其呈浅肉红色,不等粒半自形结构、交代结构,主要有微斜条纹长石(~70%)、更长石(~10%)、石英(~10%),普通角闪石及副矿物(磁铁矿、磷灰石和榍石)。

ZSG-41 和 ZSG-50 号样品采集于矿区4中段2号脉7线,为赋矿的赋存围岩,遭受一定程度的蚀变。根据详细的镜下鉴定,可以将其定为蚀变角闪石英二长岩。角闪岩和微斜长石基本遭受到碳酸盐化、绿泥石化;部分石英发生次生增大,可能是硅化叠加的缘故。此外,样品还可观测到黄铁矿化。

样品 ZSG-1、ZSG-2、ZSG-30、ZSG-31、ZSG-41 用于岩石地球化学(主微量)测试;ZSG-1 和 ZSG-50 分别代表较为新鲜的碱性杂岩和蚀变的碱性杂岩,用于其 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年和微区 Hf 同位素的测定,详细测试方法如下。

2.2 样品测试方法

主元素分析采用 X 荧光光谱仪, Ba、Sr 分析采用 ICP-AES, 其他元素(含稀土元素)分析采用 ICP-MS, 分析测试工作是由核工业地质分析测试研究中心完成。测试精度: Fe_2O_3 和 FeO 的 $\text{RSD}<10\%$, 其他主元素的 $\text{RSD}<2\%\sim 8\%$, 微量和稀土元素的 $\text{RSD}<10\%$ 。

锆石微区 LA-MC-ICP-MS 测年在中国地质科学院(CAGS)矿产资源研究所 LA-MC-ICP-MS 实验室完成, 锆石测年分析所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。采用单点剥蚀的方式, 数据分析前用锆石 GJ-1 进行调试仪器, 使之达到最优状态, 锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标, $w(\text{U})$ 、 $w(\text{Th})$ 以锆石 M127($w(\text{U})$: 923×10^{-6} ; $w(\text{Th})$: 439×10^{-6} ; Th/U : 0.475; Nasdala et al., 2008) 为外标进行校正。测试过程中在每测定5个样品前后重复测定2个锆石 GJ1 对样品进行校正, 并测量1个锆石 Plesovice, 观察仪器的状态以保证测试的精确度。数据处理采用 ICPMSDataCal4.3 程序, 测量过程中绝大多数分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}>1000$, 未进行普通铅校正, ^{204}Pb 由离子计数器检测, ^{204}Pb 含量异常高的分析点可能受包体等普通 Pb 的影响, 对 ^{204}Pb 含量异常高的分

析点在计算时剔除, 锆石年龄谐和图用 Isoplot 3.0 程序获得。详细实验测试过程可参见侯可军等(2009)。

选择已经做过锆石年龄和微量元素的锆石, 在相应的位置进行锆石 Lu-Hf 同位素分析。分析岩浆锆石和热液锆石 Lu-Hf 同位素组成的共、异性。锆石 Hf 同位素测试在 CAGS 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成, 所用仪器为 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP 213 紫外激光剥蚀系统(LA-ICP-MS), 实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气, 根据锆石大小, 剥蚀直径采用 $40\text{ }\mu\text{m}$, 测定时使用国际上通用的锆石标样 GJ-1 作为参考物质, 分析过程中的测试条件据侯可军等(2007)。

3 分析结果

3.1 年代学特征

3.1.1 锆石形态特征

ZSG-01 样品所测的 25 颗锆石多为无色透明, 表面清洁, 多数晶形完好, 呈长-短柱状, 以自形晶为主, 锆石颗粒较大, 长度介于 $80\sim 160\text{ }\mu\text{m}$, 宽度介于 $50\sim 80\text{ }\mu\text{m}$, CL 图像(图4)显示, 所有锆石内部结构均匀, 且具有韵律环带, 没有明显的蚀变边, 具有典型的岩浆锆石特征。测试样品未发现较老锆石颗粒或残留锆石颗粒, 只有少量锆石发育一圈具有明亮发光的较窄的生长边($<3\text{ }\mu\text{m}$)。测试位置和测试数据分别见图4和表1。

ZSG-50 样品所测锆石表面可能受到后期热液影响, 部分有热液蚀变。总体而言, 锆石呈长-短柱状(长宽比 $1.5:1\sim 3:1$), 晶体较自形, CL 图像显示其内部具有韵律环带, 指示着岩浆成因(图4), 且从锆石的阴极发光照片中, 未发现较老的锆石颗粒或核部的残留锆石。

3.1.2 锆石 U-Pb 年龄

详细的锆石微区定年测试结果列于表1和图4。测试样品 ZSG-01 锆石 Th 和 U 的质量分数分别为 $(118\sim 834)\times 10^{-6}$ 和 $(139\sim 574)\times 10^{-6}$, Th/U 比值在 0.64~1.65 之间变化, 且 Th、U 之间正相关性较好, 表现出岩浆锆石的地球化学特征(表1, Claesson et al., 2000)。去掉7个异常高或低的测点, 采用18个锆石点进行计算、作图。在谐和图(图5a、b)中, 锆石均落在谐和线上, 仅少数稍微偏离, 18个锆石的加权平均年龄为 $(390\pm 2)\text{ Ma}$, $\text{MSWD}=0.026$, 代表该期岩浆的

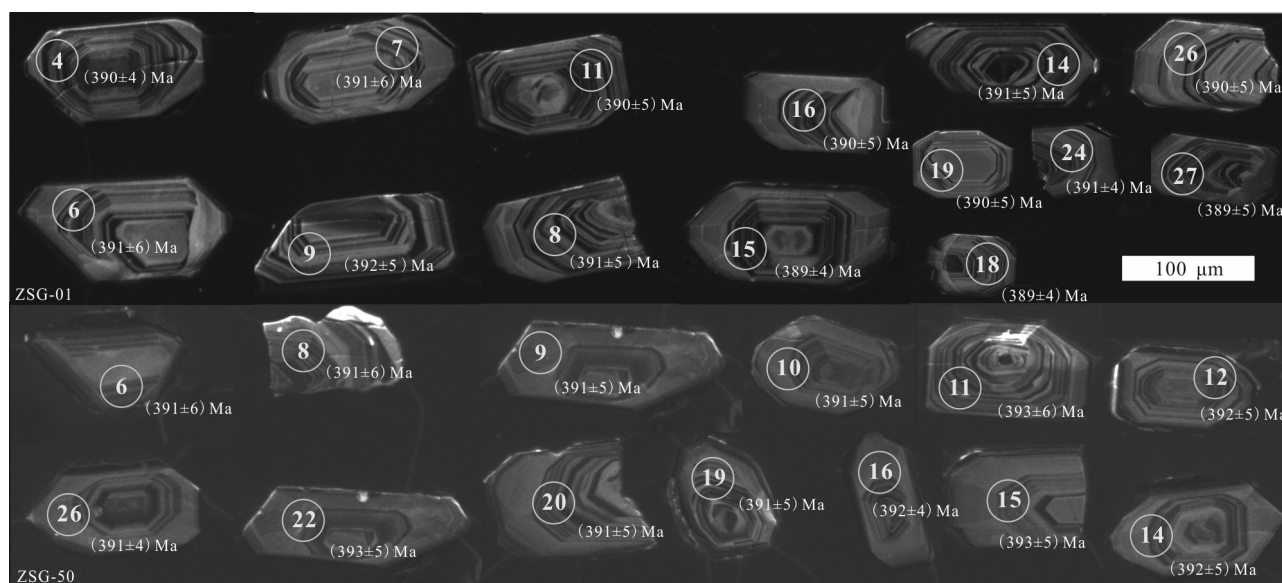


图4 中山沟金矿区样品ZSG-01和ZSG-50的锆石CL图像和测试点
Fig. 4 CL images of zircons from samples ZSG-01 and ZSG-50 in Zhongshangou Au deposit

侵位年龄,为泥盆世。

测试样品ZSG-50锆石Th和U的质量分数分别为 $(134\sim 789)\times 10^{-6}$ 和 $(119\sim 484)\times 10^{-6}$,Th/U比值在0.66~1.63之间变化,且Th、U之间正相关性较好,表现出岩浆锆石的地球化学特征(表1, Claesson et al., 2000)。去掉5个异常高或低的测点,采用15个锆石点进行计算、作图。在谐和图里,大多数锆石落在谐和线上,或者稍微偏离。15个锆石的加权平均年龄为 $(392\pm 3)\text{Ma}$, (MSWD=0.016),代表该期岩浆的侵位年龄,为泥盆世(图5c、d)。

3.1.3 锆石稀土元素特征

锆石原位微量元素分析结果和相关参数计算列于表2和图6。测试样品(ZSG-01和ZSG-50)中锆石的稀土元素含量相对高,ZSG-01和ZSG-50稀土元素总量(ΣREE)分别介于 $(444\sim 1082)\times 10^{-6}$ 和 $(480\sim 1112)\times 10^{-6}$,平均值分别为 620×10^{-6} 和 741×10^{-6} 。具体而言,测试样品(ZSG-01和ZSG-50) ΣLREE 相对亏损,其数值分别介于 $(34.8\sim 107.6)\times 10^{-6}$ 和 $(40.0\sim 79.2)\times 10^{-6}$,平均含量分别为 57.2×10^{-6} 和 60.5×10^{-6} 。 ΣHREE 则相对富集,其数值分别介于 $(412\sim 999)\times 10^{-6}$ 和 $(349\sim 1039)\times 10^{-6}$,平均值分别为 589×10^{-6} 和 681×10^{-6} 。测试样品(ZSG-01和ZSG-50)LREE/HREE值范围分别为0.05~0.14和0.06~0.13, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 分别为0.000 002~0.006 983和0.000 004~0.019 198。

在球粒陨石标准化分布图(图6)中,测试样品(ZSG-01和ZSG-50)呈现出相似的展布样式,均呈现出相对低的LREE含量及较陡直的HREE富集模型,并伴随着中等-强烈的 δCe 异常(大部分测试点 >50)和不明显的 δEu 异常。

3.2 元素地球化学分析结果

3.2.1 主量元素

中山沟矿区碱性杂岩体主要为石英二长岩,测试全岩样品的化学分析数据以及计算所获有关参数列于表3。石英二长岩主量元素具有以下特征:

(1)具有高Si高碱质的特征, $w(\text{SiO}_2)$ 为60.84%~67.34%,平均值为63.20%;碱质组分 $w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 变化范围较小,但总体而言含量较高,全碱 $w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 变化范围为7.31%~10.10%,平均值为9.10%;里特曼指数(σ)平均值为4.13,大多显示出碱性岩系列。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值的变化范围较大,介于0.54~0.99,平均值0.82,指示了相对富钠。在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 和QAP图解(图7c)中,测试样品分布在(石英)正长岩、石英二长岩和二长岩区域(图7a、b),被定义为高钾钙碱性系列。

(2)铝质含量高, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 介于15.38%~18.81%,平均值为16.31%;A/CNK比值为0.76~1.03,平均值为0.85,A/NK比值为1.10~1.62,平均值为1.30,为准铝质岩体(图7d)。

表1 中山沟金矿区碱性花岗杂岩 LA-ICP-MS 锆石 U/Pb 分析结果统计表

Table 1 Statistical table of LA-ICP-MS zircon U/Pb analytical results of alkaline granite from the Zhongshangou Au deposit

点号	$w(B)/10^{-6}$			比值						$\pm 1\sigma$	年龄/Ma						
	Pb 总量	Th ²³²	U ²³⁸	Th ²³² /U ²³⁸	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	$\pm 1\sigma$	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	$\pm 1\sigma$	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ U	$\pm 1\sigma$	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	$\pm 1\sigma$	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	$\pm 1\sigma$	谐和度
ZSG-01																	
4	265	591	510	1.16	0.0571	0.0012	0.4939	0.0117	0.0624	0.0007	498.2	46.3	407.6	7.9	390.2	4.4	95%
5	100.0	207	212	0.98	0.0575	0.0019	0.4941	0.0161	0.0625	0.0009	522.3	72.2	407.7	10.9	390.8	5.7	95%
6	99.3	227	200	1.14	0.0552	0.0018	0.4767	0.017	0.0626	0.0009	420.4	78.7	395.8	11.7	391.5	5.7	98%
7	154	328	378	0.87	0.0548	0.0013	0.4715	0.0116	0.0625	0.0008	466.7	51.9	392.3	8.0	390.7	4.9	99%
8	81.9	172	173	0.99	0.055	0.0018	0.4746	0.0161	0.0625	0.0008	413.0	72.2	394.4	11.1	390.8	4.6	99%
9	112	229	286	0.8	0.0531	0.0015	0.4589	0.0137	0.0626	0.0008	331.5	64.8	383.5	9.5	391.6	5.0	97%
11	131	280	296	0.95	0.0566	0.0016	0.4853	0.0134	0.0624	0.0009	476.0	95.4	401.7	9.2	390.2	5.2	97%
14	89.8	192	245	0.78	0.0524	0.0016	0.4496	0.0138	0.0625	0.0008	301.9	72.2	377.0	9.7	390.8	5.1	96%
15	153	345	301	1.14	0.0536	0.0016	0.461	0.0139	0.0623	0.0007	353.8	66.7	384.9	9.7	389.3	4.2	98%
16	57.5	118	164	0.72	0.0573	0.0022	0.4907	0.0186	0.0624	0.0008	501.9	83.3	405.4	12.7	389.9	5.1	96%
17	357	834	574	1.45	0.0554	0.0012	0.4759	0.0113	0.0623	0.0007	427.8	50.0	395.3	7.8	389.4	4.3	98%
18	68.2	155	139	1.11	0.0551	0.0025	0.4706	0.0219	0.0622	0.0009	416.7	106.5	391.6	15.1	389.2	5.6	99%
19	123	277	275	1.01	0.0549	0.0014	0.4729	0.0134	0.0623	0.0008	409.3	63.9	393.2	9.2	389.6	4.7	99%
23	124	280	245	1.14	0.0529	0.0017	0.4549	0.0147	0.0626	0.0008	324.1	72.2	380.7	10.3	391.1	4.6	97%
24	143	324	305	1.06	0.0557	0.0015	0.4802	0.0129	0.0625	0.0007	442.6	57.4	398.2	8.9	391.0	4.5	98%
25	73	145	228	0.64	0.0583	0.0018	0.5024	0.0171	0.0624	0.0009	542.6	68.5	413.3	11.5	390.3	5.5	94%
26	168	382	335	1.14	0.0544	0.0014	0.4674	0.0131	0.0624	0.0008	387.1	57.4	389.4	9.1	389.9	4.8	99%
27	114	255	250	1.02	0.0547	0.0021	0.4688	0.018	0.0622	0.0008	398.2	80.6	390.4	12.4	389.2	4.9	99%
ZSG-50																	
6	86.3	194	226	0.86	0.055	0.0016	0.4746	0.0153	0.0626	0.001	413.0	64.8	394.3	10.6	391.5	5.8	99%
8	62.0	134	119	1.13	0.056	0.0024	0.4789	0.0206	0.0626	0.0009	453.8	96.3	397.3	14.2	391.6	5.3	98%
9	70.8	155	185	0.84	0.0545	0.0018	0.4683	0.0156	0.0626	0.0009	390.8	69.4	390.0	10.8	391.4	5.2	99%
10	116	255	287	0.89	0.0553	0.0018	0.4791	0.0176	0.0626	0.0009	433.4	74.1	397.5	12.1	391.2	5.3	98%
11	138	302	296	1.02	0.0562	0.0015	0.4837	0.0135	0.0629	0.001	457.5	59.3	400.6	9.2	392.9	5.9	98%
12	194	431	478	0.9	0.054	0.0012	0.4673	0.0124	0.0627	0.0008	368.6	51.9	389.4	8.6	392.1	5.0	99%
14	110	231	305	0.76	0.0547	0.0015	0.4736	0.014	0.0628	0.0008	398.2	56.5	393.7	9.7	392.5	4.8	99%
15	84.0	200	302	0.66	0.0547	0.0016	0.4696	0.0139	0.0628	0.001	398.2	64.8	390.9	9.6	392.9	5.8	99%
16	312	789	484	1.63	0.0537	0.0011	0.4641	0.0106	0.0628	0.0007	366.7	78.7	387.1	7.4	392.4	4.4	98%
19	168	382	347	1.1	0.0555	0.0014	0.4776	0.0125	0.0625	0.0008	431.5	53.7	396.4	8.6	391.0	5.1	98%
20	130	287	295	0.97	0.0547	0.0015	0.4712	0.014	0.0626	0.0009	398.2	58.3	392.0	9.6	391.5	5.4	99%
22	95.9	215	243	0.89	0.0551	0.0018	0.4749	0.0149	0.0628	0.0008	416.7	72.2	394.6	10.2	392.8	4.6	99%
23	226	534	395	1.35	0.0551	0.0012	0.476	0.0114	0.0626	0.0008	416.7	54.6	395.4	7.9	391.7	4.7	99%
26	87.6	186	275	0.68	0.0549	0.0015	0.4731	0.014	0.0626	0.0007	405.6	67.6	393.3	9.6	391.5	4.4	99%
27	98.2	209	304	0.69	0.0544	0.0016	0.4662	0.0138	0.0626	0.0008	387.1	68.5	388.6	9.5	391.1	4.8	99%

(3)岩石分异程度较高,DI指数(标准矿物石英+正长石+钠长石,Thornton et al., 1960)变化于72.24~84.67之间,平均值为78.26。

在Harker图解(图8a~i)中多数样品表现了随

SiO₂增加,铁镁质矿物(TiO₂、TF₂O₃)降低,Al₂O₃和CaO也呈下降趋势,表现出同源岩浆演化特征。

3.2.2 微量元素

石英二长岩样品中的地幔不相容元素总体上呈

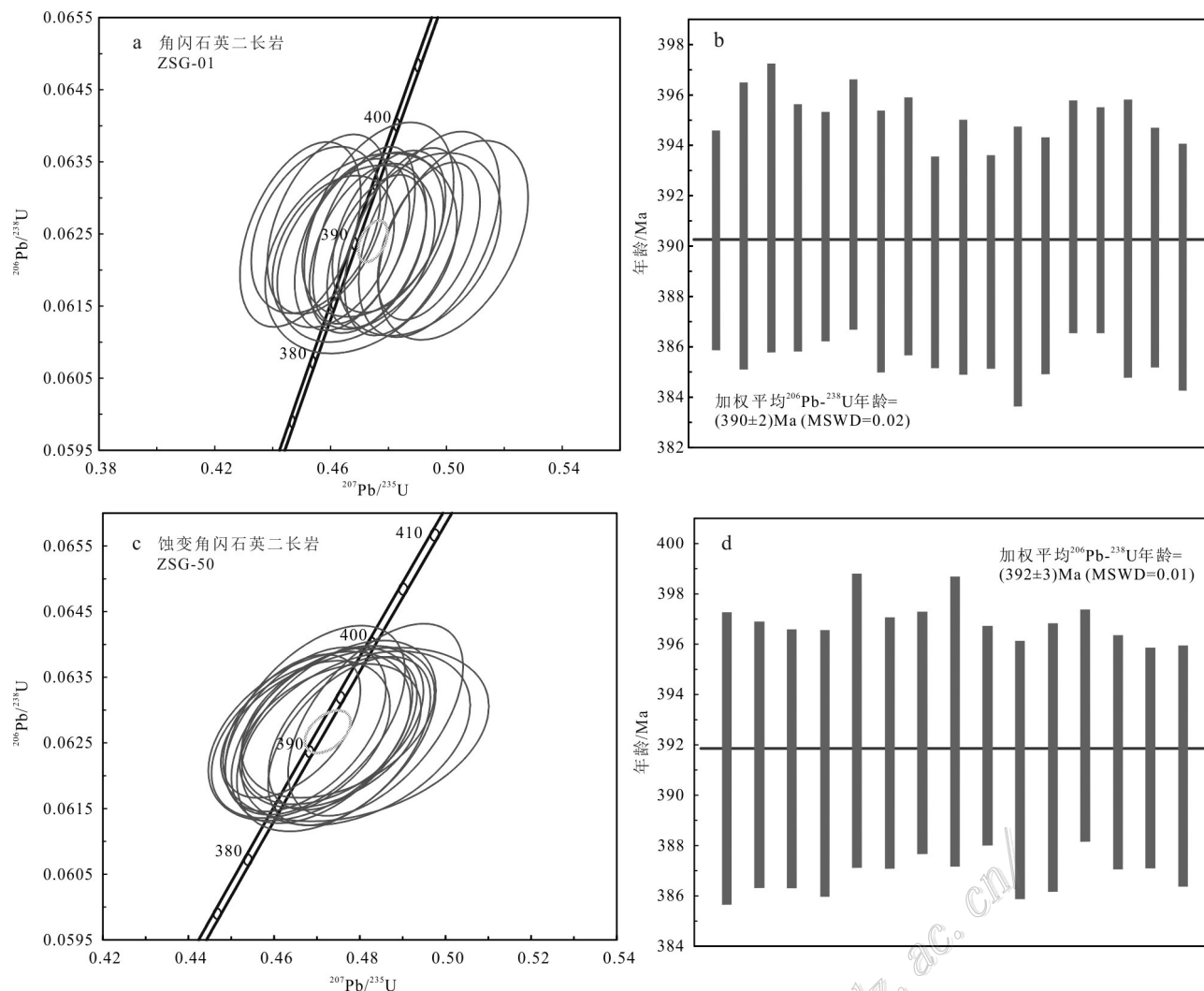


图5 中山沟金矿区碱性侵入岩样品锆石U-Pb年龄谐和曲线(a,c)和加权平均年龄图(b,d)

Fig. 5 Zircon U-Pb Concordia diagram (a, c) and weighted mean age (b, d) showing all LA-MC-ICP-MS data points for zircons from the alkaline intrusive rock samples in the Zhongshangou Au deposit

现富集的特征。就大离子亲石元素而言,相对于MORB值(Sun et al., 1989) Sr、Rb、K、Ba、La、Ce和Th呈现出中等-强富集。就高场强元素而言,其呈现弱富集或亏损,其中,Y呈现出略微亏损,为0.33~0.57; Ti相对亏损了0.31~0.49倍; Zr相对富集了1.36~2.21倍; Hf相对富集了1.39~1.89; Nb和Ta相对富集3.73~5.54倍和2.78~4.14倍。

在微量元素对原始地幔标准化分布蛛网图(图9a)中,随不相容程度不断减小的,元素整体上呈右倾形态,5件样品总体特征较为一致,呈现出富集大离子亲石元素(LILE)相对富集的形态, Ba、K、La、Sm、Y呈现明显的峰值;部分大离子亲石元素具有相对亏损的形态,如Nb、P、Ti、HREEs。

矿区石英二长岩具有低 $Mg^\#$ 值,且过渡金属元素(Cr、Co、Ni)的含量也明显偏低,远低于华北克拉通下地壳(平均值分别为221, 35.78×10^{-6}) (Gao et al., 1998),反映岩体部分熔融程度相对较低,或者岩体中地壳组分更高。此外,测试样品的放射性元素(Th、U)亦相对亏损,可能与下地壳源区在部分熔融之前发生麻粒岩相变质有关,或者代表一个氧化的环境。石英二长岩Rb/Sr和Rb/Ba比值分别在0.06~0.29和0.03~0.16,大多测试样品均小于0.1,较低的Rb/Sr可能反应幔源组分特征。

研究区石英二长岩的稀土元素总量较低且变化范围较大,范围介于 106×10^{-6} ~ 227×10^{-6} 。稀土元素配分曲线(图9b)表现为轻稀土元素富集,重稀土元

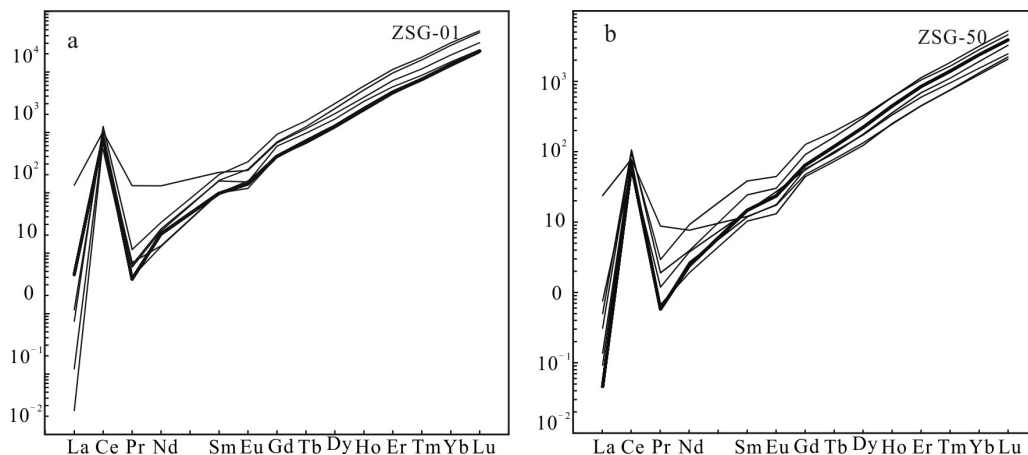


图6 中山沟金矿区样品ZSG-01(a)和ZSG-50(b)的锆石稀土元素陨石标准化配分图(标准化的球粒陨石数值据Sun et al.,1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of zircons from samples ZSG-01(a) and ZSG-50(b) in Zhongshangou Au deposit (normalized data from Sun et al., 1989)

表2 中山沟金矿区碱性花岗杂岩锆石稀土元素组成

Table 2 The REE composition in zircon of alkaline granite from the Zhongshangou Au deposit

样品名	$w(B)/10^{-6}$															ΣREE	δEu	δCe
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y			
ZSG-01																		
ZSG-01-4	0.02	76.7	0.11	1.50	3.05	1.89	19.05	5.79	76.1	33.1	182	44.8	515	122	1220	1081.80	0.76	427.58
ZSG-01-5	3.15	63.0	1.25	6.11	3.35	1.36	13.69	4.29	51.5	21.5	119	28.7	324	77.4	784	718.30	0.62	7.77
ZSG-01-6	0	50.2	0.06	1.18	2.40	0.88	12.13	3.62	42.2	18.5	93.6	22.5	248	59.2	633	554.50	0.50	925.73
ZSG-01-7	0.03	59.1	0.06	1.09	2.45	1.41	14.27	4.62	62.7	28.4	159	40.2	468	114	1059	955.24	0.73	370.80
ZSG-01-8	0	31.7	0.04	0.60	1.52	0.91	8.12	2.55	30.6	13.3	73.8	18.3	210	53.1	498	444.18	0.79	0.69
ZSG-01-9	0	44.7	0.07	0.62	1.52	0.69	8.1	2.44	30.1	12.9	71.7	18.5	214	54.3	494	459.88	0.60	1755.19
ZSG-01-11	0.10	49.4	0.04	0.97	1.50	0.81	8.22	2.70	32.2	14.0	77.0	19.2	226	56.6	397	488.49	0.71	199.37
ZSG-01-14	0.07	47.9	0.05	0.82	1.61	0.72	8.46	2.76	38.2	17.1	94.5	24.3	287	71.3	631	595.02	0.60	193.25
ZSG-01-15	0.04	58.7	0.15	1.57	2.59	1.00	11.8	3.82	44.5	18.4	97.3	23.0	272	65.1	659	599.72	0.55	183.16
ZSG-01-16	0.03	35.5	0.04	0.90	1.40	0.85	9.44	2.85	39.7	18.7	104	26.3	299	72.9	683	611.49	0.71	275.63
ZSG-01-17	0.03	99.4	0.14	2.12	4.14	1.74	19.0	5.70	62.2	26.2	136	33.3	382	91.8	962	863.33	0.60	376.05
ZSG-01-18	0.08	35.0	0.24	3.22	6.45	3.13	26.5	7.57	82.0	31.5	153	34.9	376	84.0	1050	843.70	0.73	63.31
ZSG-01-19	0.04	47.1	0.04	0.97	1.25	0.80	8.69	2.79	34.4	14.6	81.9	20.3	238	57.2	547	507.80	0.74	275.62
ZSG-01-23	0.04	48.9	0.03	0.94	1.63	0.76	8.62	2.61	31.0	13.2	70.5	17.8	207	50.1	484	452.81	0.62	337.51
ZSG-01-24	0.06	50.1	0.09	1.21	2.16	1.22	10.8	3.30	38.6	16.4	85.6	21.0	239	59.6	581	528.95	0.77	169.55
ZSG-01-25	0.05	32.2	0.05	0.91	1.03	0.79	8.63	3.00	39.3	18.6	105	26.9	314	78.2	678	628.71	0.81	159.08
ZSG-01-26	0.01	54.2	0.06	1.15	2.35	1.05	11.6	3.30	39.4	16.4	87.0	21.3	240	57.7	592	535.28	0.61	513.76
ZSG-01-27	0.03	48.4	0.08	1.51	2.47	1.38	15.6	4.66	57.6	23.9	129	31.9	356	86.1	876	759.09	0.68	219.18
ZSG-50																		
ZSG-50-6	5.68	48.0	0.84	3.62	1.87	1.01	9.83	2.96	34.1	14.0	74.4	19.0	212	52.6	506	480.19	0.72	5.39
ZSG-50-8	0.18	34.1	0.11	1.78	2.19	1.58	11.4	3.77	44.3	18.9	98.6	24.2	260	62.4	648	563.63	0.96	58.01
ZSG-50-9	0.02	46.1	0.06	1.26	1.83	1.04	11.8	3.58	45.2	20.3	114	28.3	326	82.7	733	681.34	0.68	315.52
ZSG-50-10	0.03	46.8	0.06	0.90	1.60	0.77	9.11	2.74	31.4	14.3	74.5	19.3	225	56.4	505	482.52	0.61	249.45
ZSG-50-11	0.07	59.1	0.28	4.32	5.94	2.59	26.0	7.30	82.6	34.0	174	41.9	479	116	1187	1033.79	0.64	100.29
ZSG-50-12	0.12	65.3	0.18	1.85	3.77	1.77	18.9	6.09	76.9	33.8	186	47.3	538	132	1222	1112.42	0.64	108.76
ZSG-50-14	0.01	39.1	0.06	1.13	2.28	1.38	13.3	4.47	56.8	25.4	140	35.5	405	98.6	897	822.67	0.77	385.42
ZSG-50-15	0.34	32.1	0.60	4.68	4.97	2.65	16.7	5.07	55.4	19.4	101	26.0	305	75.2	709	648.56	0.89	17.30
ZSG-50-16	0.04	97.4	0.18	2.12	3.72	1.74	20.9	6.32	67.2	28.2	152	36.4	403	98.2	1026	917.17	0.60	293.16
ZSG-50-19	0.01	69.3	0.19	2.34	4.41	1.95	20.4	6.11	73.2	30.2	158	38.8	434	104	1072	943.82	0.63	482.30
ZSG-50-20	3.87	59.7	1.45	8.66	3.04	1.46	13.1	3.74	42.1	17.4	93.0	22.7	260	63.6	616	593.64	0.71	6.18
ZSG-50-22	0.01	37.2	0.08	0.79	1.29	0.59	8.27	2.33	28.5	12.3	62.4	15.4	176	44.2	417	389.20	0.55	301.70
ZSG-50-23	0.02	73.8	0.11	1.48	2.49	1.27	14.7	4.35	51.8	22.4	120	28.8	325	79.2	794	725.62	0.64	396.20
ZSG-50-26	0.05	41.1	0.17	2.37	4.38	3.00	20.5	6.38	71.9	30.5	165	41.4	464	116	1075	967.16	0.97	109.56
ZSG-50-27	0	36.6	0.03	0.87	1.37	0.95	9.9	3.61	47.4	21.3	123	32.1	382	95.3	786	754.62	0.79	1143.59

表 3 中山沟金矿碱性岩全岩主量元素 ($w(B)/\%$), 微量元素 ($w(B)/10^{-6}$) 和稀土元素 ($w(B)/10^{-6}$)Table 3 Whole-rock major ($w(B)/\%$), trace ($w(B)/\%$) and rare earth ($w(B)/10^{-6}$) elements of alkaline rocks from the Zhongshangou Au deposit

组分	ZSG-1	ZSG-2	ZSG-30	ZSG-31	ZSG-41	组分	ZSG-1	ZSG-2	ZSG-30	ZSG-31	ZSG-41
SiO ₂	67.34	64.92	62.04	60.88	60.84	Mo	0.51	0.37	0.57	0.38	0.25
Al ₂ O ₃	15.40	15.84	15.38	16.12	18.81	In	0.03	0.04	0.04	0.04	0.02
Fe ₂ O ₃	2.75	3.42	3.24	4.70	3.76	Sb	0.13	0.07	0.04	0.04	0.06
FeO	1.13	1.51	1.61	2.09	1.32	Cs	1.11	1.12	7.88	4.33	0.81
MgO	0.47	0.76	0.39	0.69	0.52	Ba	833	1034	626	456	1661
CaO	2.59	3.32	4.79	3.09	4.33	W	0.61	0.60	2.49	1.20	0.47
Na ₂ O	5.31	5.74	4.21	3.68	6.56	Tl	0.45	0.49	0.61	0.59	0.36
K ₂ O	4.11	4.58	4.16	3.62	3.54	Pb	16.6	18.9	29.9	15.4	19.0
MnO	0.12	0.13	0.13	0.14	0.12	Bi	0.09	0.14	0.04	0.06	0.10
TiO ₂	0.31	0.35	0.40	0.48	0.38	Th	10.0	11.0	12.0	12.1	5.26
P ₂ O ₅	0.09	0.11	0.13	0.15	0.14	U	1.56	2.06	2.36	2.49	1.00
烧失量	1.32	0.53	4.00	6.31	0.54	Nb	9.54	10.4	11.8	13.9	9.34
合计	100.94	101.21	100.48	101.95	100.86	Ta	0.46	0.47	0.66	0.57	0.44
FeO*/(FeO*+MgO)	0.89	0.86	0.92	0.90	0.90	Zr	120	115	132	141	194
K ₂ O/Na ₂ O	0.77	0.80	0.99	0.98	0.54	Hf	3.57	3.49	4.07	4.50	4.72
A/CNK	0.86	0.77	0.76	1.03	0.84	La	61.4	37.9	68.5	56.2	22.6
A/NK	1.17	1.10	1.35	1.62	1.29	Ce	86.3	63.6	76.1	65.3	42.7
T/°C	936.68	916.33	947.00	1015.73	995.20	Pr	9.86	8.67	12.4	10.8	5.62
Mg [#]	18.79	22.80	13.26	16.32	16.39	Nd	33.5	32.8	44.5	39.5	20.8
DI	84.67	82.54	75.38	72.24	76.49	Sm	5.39	5.80	7.45	6.69	3.70
σ	3.63	4.91	3.53	2.82	5.75	Eu	1.55	1.75	2.01	1.76	1.39
Li	3.76	5.19	50.4	9.25	3.42	Gd	4.66	4.77	6.02	5.33	3.04
Be	2.69	3.71	3.32	3.40	1.96	Tb	0.58	0.62	0.78	0.68	0.41
Sc	3.24	4.64	7.68	4.00	6.68	Dy	2.73	3.02	3.86	3.23	2.17
V	46.4	56.2	63.5	77.1	34.2	Ho	0.51	0.57	0.70	0.59	0.41
Cr	7.06	6.39	6.16	6.06	11.6	Er	1.64	1.87	2.12	1.82	1.42
Co	3.60	4.12	4.33	5.74	3.45	Tm	0.21	0.24	0.30	0.26	0.18
Ni	2.69	2.58	3.13	3.29	4.23	Yb	1.56	1.72	2.08	1.88	1.28
Cu	4.71	6.35	4.54	5.41	3.08	Lu	0.26	0.29	0.34	0.32	0.21
Zn	58.7	63.7	76.5	102	32.1	ΣREE	210	164	227	194	106
Ga	21.1	21.5	21.7	23.8	20.5	LREE/HREE	16.3	11.5	13.0	12.8	10.6
Rb	76.7	84.1	101	72.9	53.9	Eu/Eu*	0.93	0.99	0.89	0.87	1.23
Sr	810.3	1189	353	278	882	(La/Yb) _N	28.3	15.8	23.7	21.5	12.7
Y	15.1	16.5	20.3	16.6	11.7	δCe	0.95	0.92	0.91	0.96	1.03

注:比值单位为1。稀土元素绝对值或者球粒陨石标准化计算公式据 Sun et al., 1989。A/CNK=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)(molar ratio)。A/NK=Al₂O₃/(Na₂O+K₂O)(molar ratio)。(La/Yb)_N=(La/La*)/(Yb/Yb*); δEu(Eu/Eu*)=(Eu/Eu*)/{0.5×[(Sm/Sm*)+(Gd/Gd*)]}。(La/Yb)_N=(La/La*)/(Yb/Yb*)。DI=sum of normative Q+Or+Ab。

素亏损的右倾型, La 相对于球粒陨石富集了 95.4~289.2 倍, Yb 相对于球粒陨石参考值富集了 7.53~12.21 倍, (La/Yb)_N 则介于 12.67~28.29 倍之间, 相对富集轻稀土元素, 亏损重稀土元素, 这一特点也被 LREE/HREE 比值证实, 数值介于 10.61~16.30。需要指出的是, LREEs 的分异也尤为明显, (La/Sm)_N=

3.84~7.17, 但 HREEs 的分异不甚明显, (Gd/Yb)_N=1.92~2.41。5 件样品曲线基本平行, Eu/Eu* 呈现出弱负至正 Eu 异常, 分别介于 0.87~1.23。

3.3 Hf 同位素

在 La-ICPMS 锆石 U-Pb 测年的基础上, 对矿区石英二长岩的 2 个样品 (ZSG-01 和 ZSG-50) 的锆石

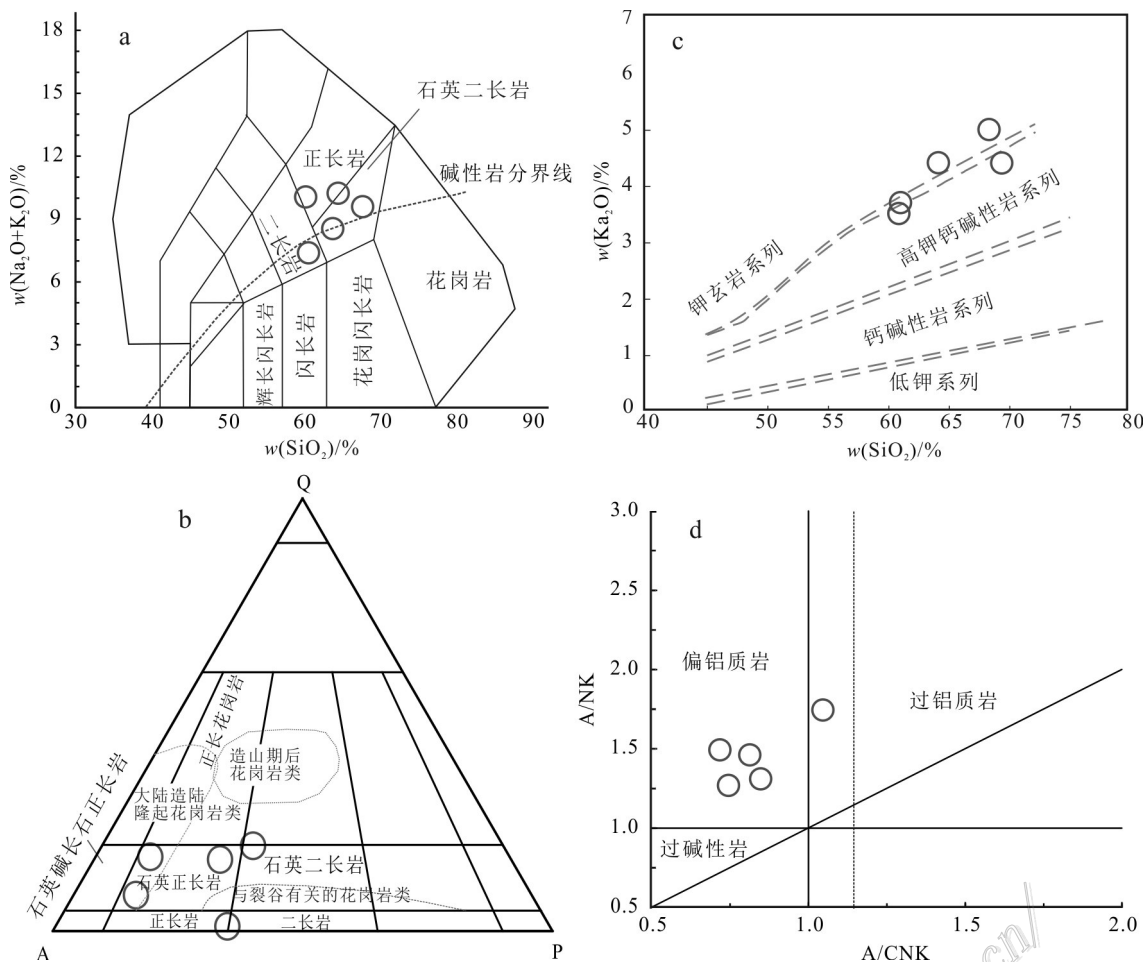


图7 中山沟金矿区典型侵入岩样品地球化学图解

a. SiO_2 -($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)图解 (Rollinson, 1993); b. QAP图解; c. SiO_2 - K_2O (Middlemost, 1994); d. A/CNK - A/NK 图解 (Maniar et al., 1989)

Fig. 7 Geochemical diagrams of typical intrusive rock samples from Zhongshangou Au deposit

a. SiO_2 versus ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) diagram (Rollinson, 1993); b. QAP diagram; c. SiO_2 versus K_2O diagram (Middlemost, 1994); d. A/CNK versus A/NK diagram (Maniar et al., 1989)

微区 Lu-Hf 同位素测定, 结果详细见表 4。

样品 ZSG-01 和 ZSG-50 锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值相对均一, 分别介于 0.000 76~0.002 04 和 0.000 78~0.003 13 之间, 均值分别为 $0.001\,29\pm0.000\,01$ (1σ , $n=18$) 和 $0.001\,66\pm0.000\,02$ (1σ , $n=18$), 均小于 0.0020, 显示锆石析出后具有少量或无放射成因 Hf 的积累 (吴福元等, 2007)。测试样品 (ZSG-01 和 ZSG-50) 锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值呈现低值且变化浮动小, 分别介于 0.282 012~0.282 138 和 0.281 993 5~0.282 142, 对应的加权平均值则为 $0.282\,070\pm0.000\,244$ (2σ , $n=18$) 和 $0.282\,054\pm0.000\,264$ (2σ , $n=15$)。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别分布在 -14.3 688~-17.1 591 和 -14.1 044~-19.3 289。二阶段 Hf 模式年龄 ($T_{\text{DM}2}$) 变化范围为分别为 2284~2554 Ma 和 2269~2595 Ma, 对应的平均值分别为

2424 Ma 和 2465 Ma。

4 讨 论

4.1 侵位时代与地质意义

从大地构造位置上看, 水泉沟碱性侵入岩与 E-W 向尚义-崇礼深大断裂带密切相关, 并主要产出在近 E-W 向与 NE 向断裂的交汇部位。水泉沟碱性杂岩体具有规模大、岩性组合 (角闪正长岩、角闪辉石二长岩、角闪石英碱长正长岩、霓辉碱长正长岩、碱长正长岩、石英碱长正长岩、石英二长岩) 复杂的特征。根据详细的地质观测, 矿区的碱性侵入岩主要为角闪石英二长岩, 其被矿区外围被早白垩世火山岩 (136~143 Ma, 韦忠良等, 2008) 不整合覆盖, 且矿区

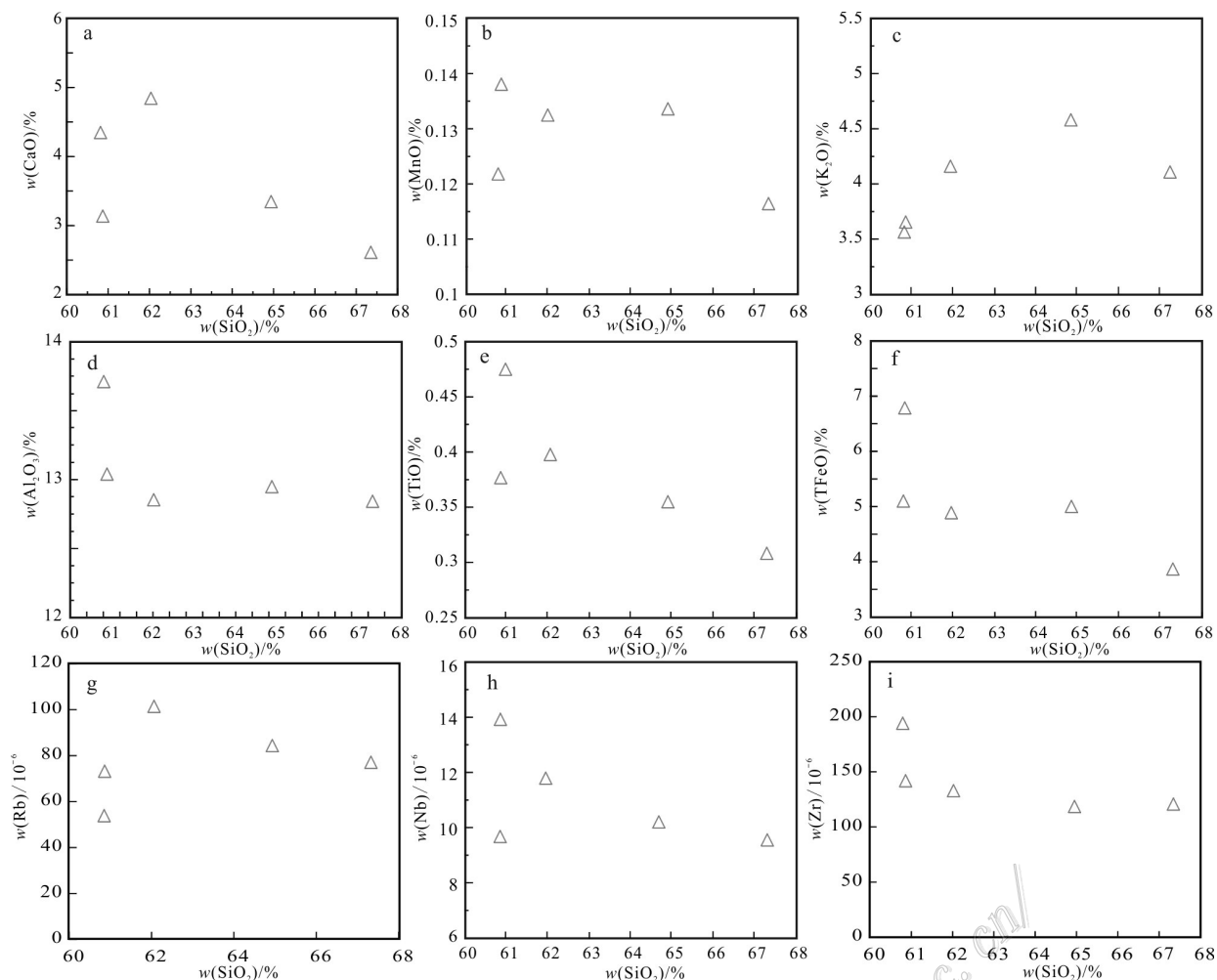


图 8 中山沟金矿区典型侵入体样品 Hark 图解

a. $\text{CaO}-\text{SiO}_2$ 图解; b. $\text{MnO}-\text{SiO}_2$ 图解; c. $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解; d. $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 图解; e. $\text{TiO}-\text{SiO}_2$ 图解;
f. $\text{FeO}-\text{SiO}_2$ 图解; g. $\text{Rb}-\text{SiO}_2$ 图解; h. $\text{Nb}-\text{SiO}_2$ 图解; i. $\text{Zr}-\text{SiO}_2$ 图解

Fig. 8 Hark diagram of typical intrusive rock samples from Zhongshangou Au deposit

a. CaO versus SiO_2 diagram; b. MnO versus SiO_2 diagram; c. K_2O versus SiO_2 diagram; d. Al_2O_3 versus SiO_2 diagram; e. TiO versus SiO_2 diagram;
f. FeO versus SiO_2 diagram; g. Rb versus SiO_2 diagram; h. Nb versus SiO_2 diagram; i. Zr versus SiO_2 diagram

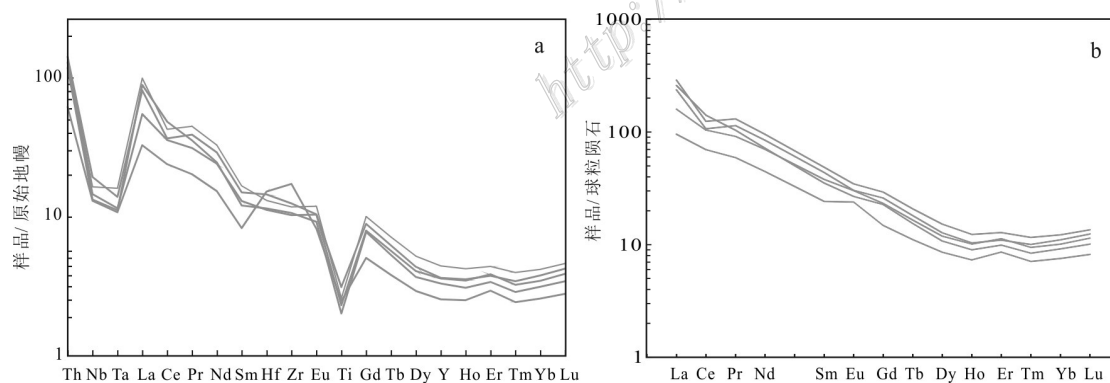


图 9 中山沟金矿区典型侵入体样品微量元素蛛网图(a)稀土元素球粒陨石标准化(b)图解(标准化值据 Wakita et al., 1971; Sun et al., 1989)

Fig. 9 Trace element spider diagram(a) and Chondrite-normalized REE patterns(b) of typical intrusive rock samples from Zhongshangou Au deposit(normalized data from Wakita et al., 1971; Sun et al., 1989)

表4 中山沟金矿区碱性花岗杂岩 LA-MC-ICP-MS Zircon Hf isotopic compositions of alkaline granite from the Zhongshangou Au deposit

测点	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2s$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1}	T_{DM2}	f_{LwHf}	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(\text{DM})_i$
ZSG-01										
ZSG01-4	0.001966905	0.282137916	0.00002	-22.35328511	-14.36876008	2.296697284	2.284726354	-0.940755859	0.28252951	0.28297053
ZSG01-5	0.001456354	0.282090688	0.00003	-24.02347765	-15.89643197	2.392502121	2.380900319	-0.956133918	0.282529156	0.28297012
ZSG01-6	0.001035537	0.282051502	0.00003	-25.40928964	-17.1590505	2.471755472	2.460528285	-0.968809113	0.282528705	0.282969599
ZSG01-7	0.001625369	0.282095865	0.00002	-23.84039791	-15.75848456	2.383840921	2.372144982	-0.951043109	0.282529202	0.282970173
ZSG01-8	0.001049629	0.282065988	0.00002	-24.89697751	-16.66584657	2.440449583	2.429158194	-0.968384679	0.28252917	0.282970136
ZSG01-9	0.000900701	0.282045218	0.00002	-25.63150031	-17.34363341	2.483335052	2.472222661	-0.972870451	0.282528623	0.282969503
ZSG01-11	0.000759706	0.282025505	0.00002	-26.32863719	-18.03988452	2.525324593	2.514465385	-0.977117276	0.282529544	0.282970568
ZSG01-14	0.000780092	0.282055662	0.00002	-25.26215202	-16.96129072	2.458865516	2.447756781	-0.976503251	0.282529162	0.282970127
ZSG01-15	0.002044718	0.282084766	0.00004	-24.23291174	-16.28817777	2.415801128	2.404019821	-0.938412106	0.282530055	0.282971116
ZSG01-16	0.000986161	0.28207567	0.00003	-24.55459437	-16.32422758	2.41851897	2.407232624	-0.970296369	0.28252968	0.282970726
ZSG01-17	0.001918918	0.282064315	0.00002	-24.95616285	-16.97926404	2.458877577	2.447253382	-0.942201254	0.282530045	0.282971149
ZSG01-18	0.001306331	0.282011707	0.00003	-26.81659746	-18.68703315	2.565007136	2.554029479	-0.960652679	0.282530156	0.282971277
ZSG01-19	0.001200734	0.282062391	0.00002	-25.02418553	-16.8567576	2.451442715	2.440153572	-0.963833304	0.282529889	0.282970967
ZSG01-24	0.001107771	0.282062373	0.00002	-25.02482006	-16.80330804	2.449217821	2.437911299	-0.9666334	0.282529008	0.282969948
ZSG01-25	0.001395735	0.282096519	0.00002	-23.8172809	-15.68482139	2.378915618	2.367333233	-0.95795979	0.282529465	0.282970478
ZSG01-26	0.001107335	0.282103564	0.00002	-23.56812327	-15.36862144	2.358902541	2.347421004	-0.966646525	0.282529692	0.282970774
ZSG01-27	0.00135136	0.282056803	0.00003	-25.22181417	-17.10295828	2.466425659	2.455120166	-0.959296385	0.28253017	0.282971293
ZSG-50										
ZSG50-6	0.000961044	0.282044811	0.0000228	-25.64590276	-17.37750364	1.698847953	2.474175434	-0.971052888	0.282528733	0.282969631
ZSG50-8	0.001918881	0.282113168	0.0000302	-23.22847748	-15.20356703	1.645389192	2.337984745	-0.942202382	0.282528647	0.282969532
ZSG50-9	0.001487589	0.281993549	0.0000257	-27.45875334	-19.32889161	1.794757128	2.595626933	-0.955193114	0.282528746	0.282969646
ZSG50-10	0.001685739	0.282048706	0.0000312	-25.50814834	-17.4320394	1.726336981	2.477046734	-0.94922474	0.282528866	0.282969785
ZSG50-11	0.002084756	0.282107773	0.0000245	-23.41927631	-15.40962593	1.660513738	2.35179712	-0.937206152	0.282527804	0.282968556
ZSG50-12	0.001570736	0.282096229	0.0000227	-23.82753202	-15.7030772	1.653987612	2.3697149	-0.952688689	0.282528358	0.282969198
ZSG50-14	0.00149548	0.282070052	0.0000231	-24.75325019	-16.60150914	1.687532951	2.42619076	-0.954955408	0.282528106	0.282968905
ZSG50-15	0.003126663	0.28201836	0.0000351	-26.58133455	-18.84635759	1.840282344	2.565648457	-0.905823399	0.282527826	0.282968582
ZSG50-16	0.001532725	0.282040069	0.0000231	-25.81357831	-17.67470236	1.731448922	2.4931005	-0.953833587	0.282528173	0.282968983
ZSG50-19	0.001253522	0.281998817	0.0000226	-27.27243985	-19.09130593	1.776277678	2.580615284	-0.962243316	0.282529028	0.282969972
ZSG50-20	0.001340673	0.282012609	0.0000323	-26.78468375	-18.61499637	1.761079157	2.551234288	-0.959618296	0.282528712	0.282969607
ZSG50-22	0.000781159	0.28202735	0.0000193	-26.26339637	-17.92104603	1.714960701	2.509166899	-0.976471117	0.282527927	0.282968698
ZSG50-23	0.001580264	0.282064061	0.0000271	-24.96511514	-16.85188599	1.699810887	2.441209049	-0.952401698	0.282528589	0.282969465
ZSG50-26	0.002545354	0.282032664	0.0000352	-26.07545385	-18.21812034	1.790258294	2.525774374	-0.923332718	0.282528728	0.282969625
ZSG50-27	0.001605724	0.2821422	0.0000218	-22.20180102	-14.10435855	1.590541845	2.269026672	-0.951634817	0.282528933	0.282969862

碱性杂岩偶见中元古界长城系白云质灰岩捕虏体,表明碱性杂岩体侵入于中元古界。因此,从产状及接触关系上看,矿区碱性岩侵入的上限为早白垩(136~143 Ma),下限为中元古界。

根据前文所述测试锆石的形态特征,其具有较为显著的岩浆锆石特征,结合 Th/U 比值及两者正相关等参数,蚀变角闪黑云二长岩产出的锆石尽管遭受一定热液侵入,但未发生重置。其与新鲜角闪黑云二长岩中的锆石基本一致,均显示出典型岩浆锆石的特征。在锆石稀土元素配分图解,稀土元素呈现出 LREE 亏损、HREE 逐步富集的“海鸥”上翘式展布,即从 Sm 到 Lu 逐渐增高,同时显示 Ce 的强烈正异常和 Eu 的负异常(图 6),指示着他们在相对氧化的条件下结晶,与岩浆锆石的特征相似。 $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ -Ce/Ce* 和 La- $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ 的判别图(图 10)进一步证实了该观点,大多数测试锆石均落入岩浆锆石范围内。因此,测试样品的锆石为岩浆锆石,并未遭受明显的后期蚀变,获得的 U-Pb 年龄(389~395 Ma)介于早白垩世与中元古界之间,为矿区碱性侵入岩的形成时代提供了较为可靠的年龄依据。

前人对水泉沟-后沟杂岩体进行了较多的定年工作,本文统计了较为可信的年龄数据详见表 5。其中,水泉沟岩体西段的下双台的角闪正长岩和下盘地的角闪二长岩的年龄相对年轻,测得锆石 U-Pb 年龄分别为 372~373 Ma(李长民等,2014);中山沟矿区外围和下三道河的角闪二长岩和二长岩的锆石

U-Pb 年龄为 391~410 Ma(陆松年等,1997;胡小蝶等,1998)。就东段而言,水泉沟东段东坪金矿区的蚀变细粒正长岩、石英二长岩和角闪二长岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 $(381\pm3)\text{Ma}$ 、 $(390\pm6)\text{Ma}$ 、 $(400\pm4)\text{Ma}$ (罗镇宽等,2001;李长民等,2010; Bao et al., 2014);后沟矿区蚀变正长岩和新鲜正长岩的锆石 U-Pb 年龄均为 $(386\pm7)\text{Ma}$ (李长民等,2010a; 2010b)。从水泉沟的年代构架上,碱性杂岩可能经历了长达~40 Ma 演化,至少经历了 3 期热事件脉动的结果。其中,水泉沟碱性岩体热事件演化早期,岩石组合则以角闪二长岩和石英二长岩为主,形成时代为 409~412 Ma;水泉沟碱性岩体热事件演化中期,岩石组合与早期基本一致,其与区域金矿化(东坪、后沟以及本次中山沟)更为密切,形成时代为早志留世(389~395 Ma);岩体热事件演化晚期,岩石组合以角闪正长岩和角闪二长岩为主,形成时代为早志留世(372~375 Ma)。需要指出的是,志留纪侵入之后,矿区及外围的岩浆活动和构造也发生了多次脉动,绢云母或黑云母基本上存在多期次的特征,这些岩体的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 统计年龄存在多期的特征(江思宏等,2000)。本次测得的矿区角闪石英二长岩的锆石 U-Pb 年龄为 389~395 Ma,与水泉沟岩体东段的东坪金矿区石英二长岩($(390\pm6)\text{Ma}$)和角闪二长岩($(400\pm4)\text{Ma}$)的锆石 U-Pb 年龄、后沟金矿区正长岩的锆石 U-Pb 年龄($386\pm7\text{Ma}$)基本相当,为水泉沟碱性杂岩第二期热事件的产物。

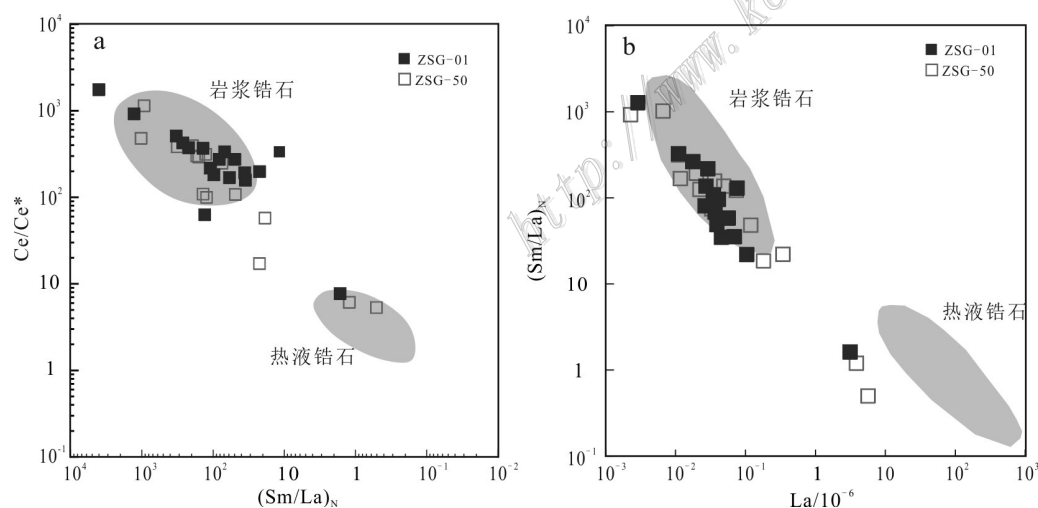


图 10 中山沟金矿区碱性花岗杂岩锆石类型判别图(Hoskin, 2005)

a. $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ -Ce/Ce*图解; b. La- $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ (b)图解

Fig. 10 Zircon type discrimination diagrams of alkaline granite from the Zhongshangou Au-deposit(Hoskin, 2005)

a. $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ versus Ce/Ce* diagram; b. La versus $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ diagram

表 5 水泉沟-后沟碱性杂岩测试年龄统计表

Table 5 Statistical table of isotopic ages of the Shuiquangou-Hougou alkaline complex

序号及采样位置	测试样品	测年方法	测试年龄/Ma	资料来源
西段				
1 下双台	角闪正长岩	锆石 U-Pb 法	373±3	李长民等, 2014
2 营盘地	角闪正长岩	锆石 U-Pb 法	373±2	
3 中山沟矿区外围	角闪二长岩	锆石 U-Pb 法	411±1	胡小蝶等, 1998
4 中山沟矿区石英脉	石英脉中	锆石 U-Pb 法	391±1	陈超等, 2021
5 下三道河	石英二长岩	锆石 SHRIMP U-Pb 法	410±1	陆松年等, 1997
东段				
6 东坪 1 号脉深部	钾长石石英脉	锆石 U-Pb 法	380.5±2.6	李长民等, 2010a
7 东坪金矿区	石英二长岩	锆石 U-Pb 法	390±6	李长民等, 2010a
8 东坪金矿区	角闪二长岩	锆石 U-Pb 法	400±3.5	Bao et al., 2014
9 东坪 1 号脉浅部	二长岩中	SHRIMP 锆石 U-Pb 法	390±6	罗镇宽等, 2001
10 后沟金矿区	正长岩中	SHRIMP 锆石 U-Pb 法	386±7	罗镇宽等, 2001
11 后沟金矿	正长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb 法	386±7	罗镇宽等, 2001

赋矿碱性岩与金矿化的成因关系常常被讨论, 世界许多典型的脉型金(-碲)矿化均与碱性岩浆有关(Cripple Creek, Emperor, Porgera, Ladolam and the Montana; Richards, 1995)。Jensen 等(2000)认为幔源的碱性岩浆可能是金-碲重要的物质来源。然而, 部分学者认为碱性岩与金矿化的成因联系是否被过分强调了, 许多在碱性岩省内的金矿床与钙碱性岩浆具有明确的成因联系(Baguio; Cook et al., 2005; Ciobanu et al., 2006)。冀北是华北克拉通北缘金成矿带重要组成部分, 也是中国重要的金-碲矿化带。在中山沟矿区及邻区, 显生宙以来岩浆热事件主要有 373~410 Ma、233~237 Ma 和 144~142 Ma 三个阶段。根据热液锆石和石榴石的 U-Pb 年代学测定, Miao 等(2002)和 Fan 等(2021)认为东坪金矿化可能与早白垩世岩浆热事件有关。然而, 本课题组测得含金黄铁矿和辉钼矿的 Re-Os 模式年龄分别为 375~383 Ma 和 375~379 Ma(本课题组, 未发表), 表明中山沟金多金属矿化可能与水泉沟碱性岩浆期后热液有关。本次测得角闪石英二长岩的锆石 U-Pb 年龄(389~395 Ma)能代表中山沟金矿化的上限, 也表明了两者的存在明显的成因联系。

4.2 岩浆岩的源区和源岩

4.2.1 成因类型

全岩地球化学表明, 矿区角闪石英二长岩的主量元素以中-高 $w(\text{SiO}_2)$ (60.84%~67.34%)、富碱和相对低的 A/CNK 值、CaO 和 $\text{Mg}^\#$ 为特征。微量元素方面, 测试样品表现为富集 LILEs 和 LREEs、亏损 HFSEs 和 HREEs, 并伴随着强烈的 Nb、P、Ti 亏损和

无明显的 δEu 异常, 明显不同于典型的 I 型和 S 型花岗岩(图 11a~f)。测试样品显示出贫 HFSEs, 在 $\text{Ga}/\text{Al} \times 10000$ 与 Nb 和 $\text{Ga}/\text{Al} \times 10000$ 与 Zr 图解(图 11a、b)中, 测试样品基本落入在 I/S 型和 A 型花岗岩的过渡区域, 显示出具有高分异 I 型或 A 型火山岩的特征。

在岩石类型上, A 型花岗岩包括从碱性花岗岩经碱长花岗岩到钾长花岗岩、石英正长岩、更长环斑花岗岩和紫苏花岗岩等多种岩石类型(许保良等, 1998), 一部分富碱质的 I 型花岗岩, 如高分异 I 型花岗岩也被包括进去(张旗等, 2012)。研究区所采样品主要为角闪石英二长岩和石英二长岩, 浅色矿物以碱性长石为主, 并含有部分斜长石, 碱性长石与斜长石共生, 碱性长石以微斜条纹长石为主, 斜长石以更长石为主; 暗色矿物中以角闪石为主; 副矿物以磁铁矿、磷灰石、榍石为主。造岩矿物组成上, 具有 I 型和 A 型花岗岩的矿物组成特征。

高分异的 I-型花岗岩通常具有低 $w(\text{FeO}^T)$ ($<1\%$), $w(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ ($<350 \times 10^{-6}$) 和 $w(\text{Ga})$ ($<20 \times 10^{-6}$) 以及 $w(\text{Rb})$ ($<100 \times 10^{-6}$), 锆石封闭温度普遍较低($\sim 754^\circ\text{C}$)(Whalen et al., 1987; 王强等, 2000; 隋振民等, 2007)。相比之下, A-型花岗岩普遍具有高 $w(\text{FeO}^T)$ 、 $w(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 、 $w(\text{Rb})$ 和 $w(\text{Ga})$, 结晶温度普遍 $>800^\circ\text{C}$ 。测试样品普遍具有高 $w(\text{FeO}^T)$ (3.88%~6.79%)、 $w(\text{Ga})$ ((20.47~23.79) $\times 10^{-6}$) 以及岩浆结晶温度((916.33~1015.73 $^\circ\text{C}$) $>800^\circ\text{C}$); 和较低的 $w(\text{Rb})$ ((53.18~101.30) $\times 10^{-6}$) 和 $w(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ ((206.22~258.04) $\times 10^{-6}$; 图 12)。源区亏损 Nb、Ta 与

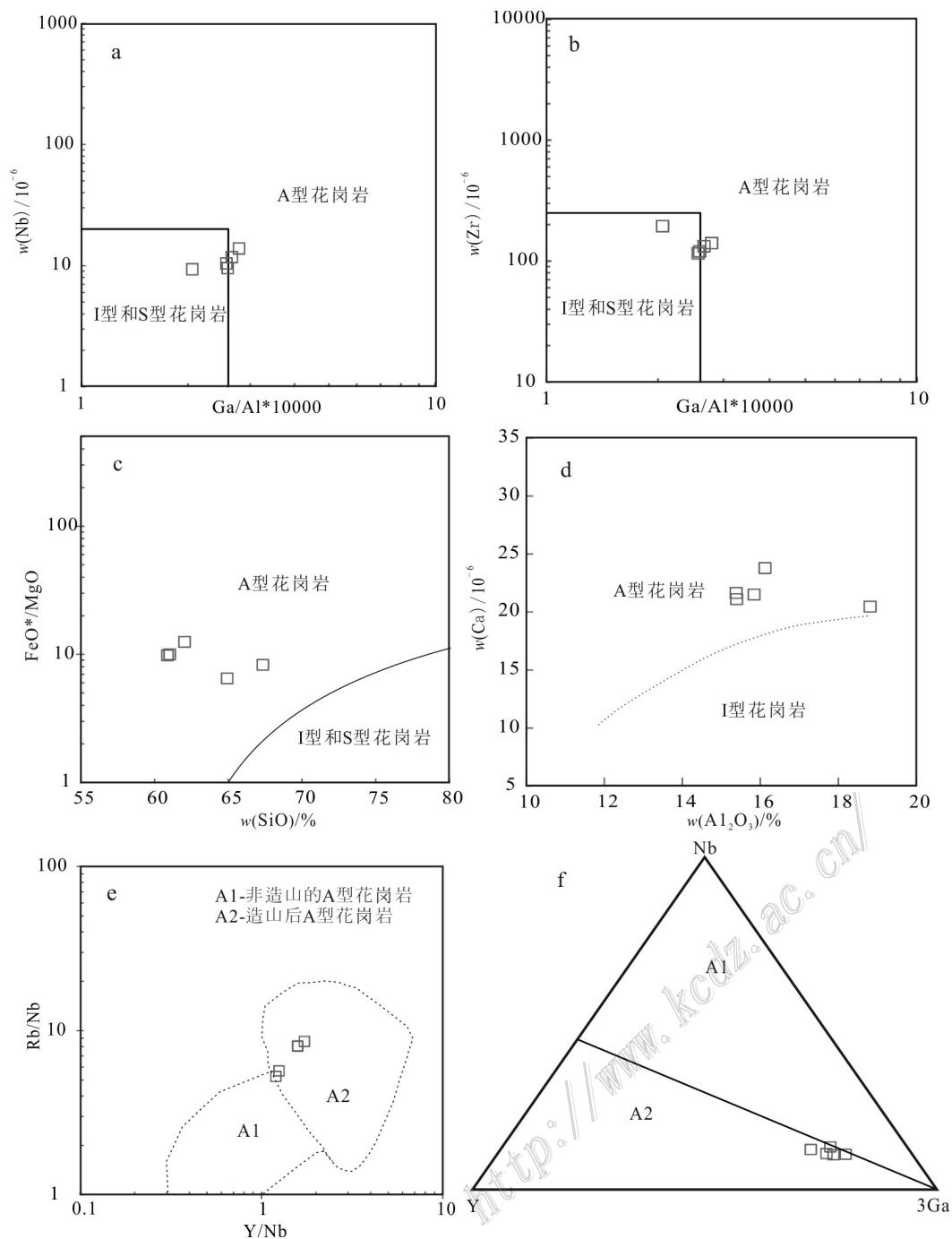


图 11 中山沟金矿区碱性花岗杂岩岩体类型判别图

a. $Ga/Al \times 10\ 000$ -Nb; b. $Ga/Al \times 10\ 000$ -Zr; c. SiO_2 - FeO^*/MgO ; d. Al_2O_3 -Ga; e. Y/Nb - Rb/Nb 和 Nb - Y - $3Ga$ 图解

Fig. 11 Classification diagrams of granite type

a. $Ga/Al \times 10\ 000$ versus Nb; b. $Ga/Al \times 10\ 000$ versus Zr; c. SiO_2 versus FeO^*/MgO ; d. Al_2O_3 versus Ga; e. Y/Nb versus Rb/Nb and Nb - Y - $3Ga$ diagrams of alkaline granite from the Zhongshangou Au deposit

源区特征有关,可能受到富集地幔影响或源区可能存在金红石的残留有关;与此同时,测试样品均显示较低的Y含量,显示源区可能存在石榴子石和角闪石的残留(Bea, 1996)。为了进一步判断测试样品的

岩体类型,在 SiO_2 与 FeO^*/MgO 和 Al_2O_3 与 Ga 图解(图 11c、d)中,测试样品均落入了 A 型花岗岩区域。综上所述,中山沟碱性侵入体是具有低 $Zr+Nb+Ce+Y$ 和 Rb 值的 A 型花岗岩。

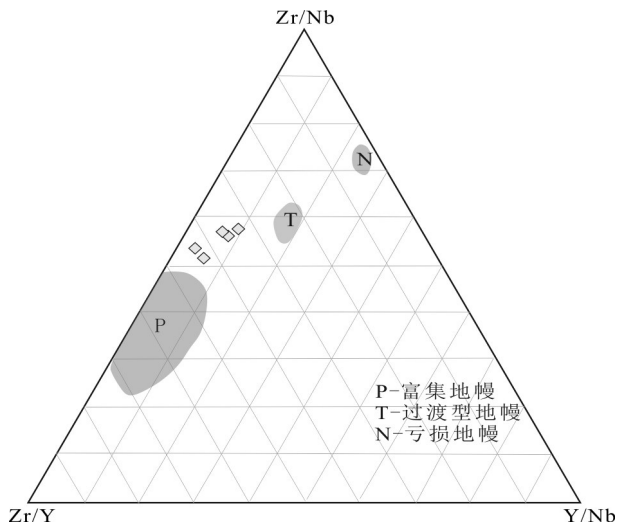


图 12 中山沟金矿区碱性花岗杂岩 Zr-T 图解

Fig. 12 Zr-T diagram of alkaline granite from the Zhongshangou Au deposit

4.2.2 源区性质和年龄

矿区石英二长岩为弱-中等 LREEs 富集型,并伴随着低 $(La/Yb)_N$ 比值 (12.67~28.29),可能指示起源于下地壳。考虑到矿区岩体包裹有大量的中元古代地层包体,且内部构造简单均一,并且与之接触的围岩产状并没有发生挤压流变构造,判断其是在拉张背景下的产物。此外,同化混染作用不可能同化如此多的地壳物质,所以推测源区为壳幔边界附近(过渡带)。根据前人研究,水泉沟杂岩体的 $\delta^{18}O$ 值分布在 6.5‰~9‰ 之间,锶同位素初始值较低, $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7062$,显示了壳-幔混合源的特征(张招崇等, 1997)。在微量元素 $(Zr/Y-Zr/Nb-Y/Nb)$ 三角图解(图 13)中,测试样品落入到富集地幔和过渡型地幔之间,同样也显示了壳-幔混合源的特征。部分微量元素的特征可能来自对源区的继承以及遭受围岩混染的结果。

具体而言,矿区岩体平均 $w(Sr)$ 和 $w(Yb)$ 分别为 703×10^{-6} 和 1.70×10^{-6} ,为高 $w(Sr)$ 低 $w(Yb)$ 型花岗岩 $w(Sr) > 400 \times 10^{-6}$, $w(Yb) < 2 \times 10^{-6}$; 张旗等, 2006)。该类侵入体的 HREEs 强烈亏损,无明显负至正 δEu 异常,暗示源区有石榴子石+辉石±角闪岩组成,残留相为榴辉岩或角闪榴辉岩相。 δEu 为弱异常-正异常,可能暗示斜长石的分异作用较低,源区无斜长石残留。Nb、Ta 亏损以及较低的 Y 和 Yb,同时也显示了源区可能残留了金红石、石榴子石、角闪石和单斜辉石。

Amelin 等 (2005) 和 Vervoort 等 (1996) 认为,

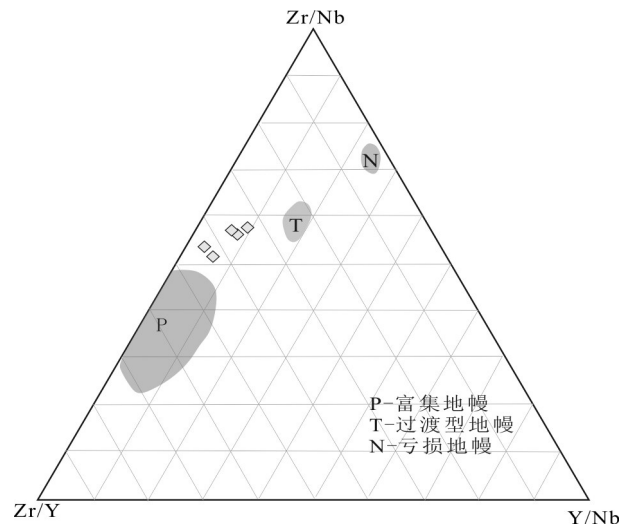


图 13 中山沟金矿区碱性花岗杂岩微量元素 Zr/Nb-Zr/Y-Y/Nb 三角图解

Fig. 13 Trace element Zr/Nb-Zr/Y-Y/Nb triangle diagram of alkaline granite from the Zhongshangou Au deposit

$f_{Lu/Hf}$ 值小于镁铁质地壳和硅铝质地壳的 $f_{Lu/Hf}$, T_{DM2} 反映源区其源区物质从亏损地幔被抽取的时间。所测样品锆石的 $f_{Lu/Hf}$ 值分别分布于 -0.9284~-0.9771 和 -0.9058~-0.9765, 均值分别为 -0.9610 和 -0.4999, 明显小于镁铁质地壳和硅铝质地壳的 $f_{Lu/Hf}$ (-0.72 和 -0.34; Amelin et al., 2000; Vervoort et al., 1996), 可能二阶段模式年龄 (T_{DM2}) 更能反应其源区物质从亏损地幔被抽取的时间。测得锆石 T_{DM2} 变化范围分别为 2284~2554 Ma 和 2269~2595 Ma, 对应的平均值分别为 2424 Ma 和 2465 Ma, 表明该源区的形成时间可能对应于华北板块的克拉通化以及地壳的生长阶段。测试样品 $\epsilon_{Hf}(t)$ 均为较低的负值, 数值介于 -18.0399~-14.3688。在 $\epsilon_{Hf}(t)-t$ 图解(图 14)中, 所有样品点位于古元古代一晚太古代地壳 (~2.5 Ga 地壳) 演化线附近, 可能为老地壳物质再熔融或古元古代一晚太古代底侵地壳物质熔融的产物。根据前人与本次研究, 桑干群花岗闪长片麻岩获得的锆石 U-Pb 年龄为 2.30~2.54 Ga (李创举等, 2012; 本课题组), 可以解释为矿区碱性杂岩的古老地壳物质来源。

综上所述, 中山沟矿区岩体显示了源区主要为晚太古代下地壳, 反映他们的源岩以地壳物质为主。此外, 微量元素特征均显示着岩体有富集地幔的混入。如果是 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 较高的地幔橄榄岩类与下地壳不同比例的混合, 则与岩体具有较低的 $Mg^\#$ 不一致。因此, 矿区岩体具有明显的壳源地球化学特征和富

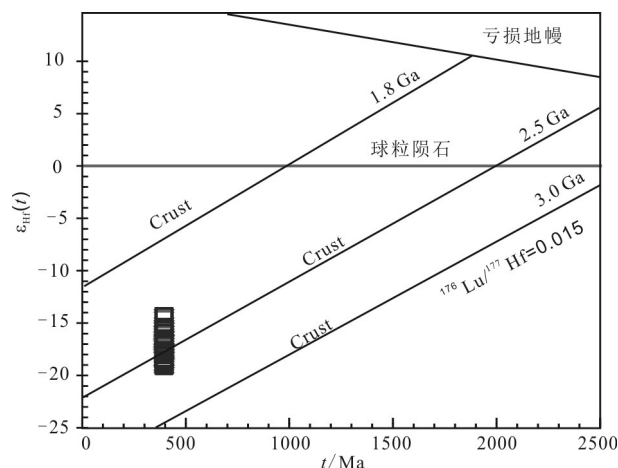
图14 中山沟金矿区碱性花岗岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解

Fig. 14 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t plot for the zircons in alkaline granite from the Zhongshangou Au deposit

集型的同位素特征,可能为增厚下地壳的部分熔融,不可能为板片熔体。因此,本文研究认为,矿区碱性侵入体可能是在伸展作用下幔源岩浆底侵,诱发玄武质岩浆的析取、岩浆底垫、分异、新生基性下地壳的重熔及其分异等一系列深部流体活动(张晓晖等,2010)。这一研究结果也间接支持了泥盆世为华北板块与西伯利亚板块主碰撞的重要时期。

4.3 构造环境与动力机制

中山沟矿区A-型侵入体的锆石LA-MC-ICP-MS测年结果为390~392 Ma,代表了泥盆世的一期构造-岩浆活动。Frost等(2001;2007)认为,A-型花岗岩形成的构造环境为造山后伸展或者非造山环境的大陆裂谷。依据构造背景(A1=非造山裂谷,A2=造山后)和地幔(<1.2)与地壳(>1.2)的Y/Nb比值差异,Eby(1990;1992)将其进一步划分了A1和A2型花岗岩,分别代表非造山裂谷环境下的幔源溶体的分离结晶和造山后环境下地壳部分熔融的产物。所有测试样品的Y/Nb比值介于1.20~1.70,均值为1.47>1.20。在Rb/Nb-Y/Nb图解和Nb-Y-Ga*3三角图解(图11e、f)中,测试样品均落入到A2型花岗岩范围内。在Y与Nb图解(图11e)中,测试样品落入到ORG范围和典型A型花岗岩之内;在Y+Nb与Rb图解(图11f)中,测试样品落入到后碰撞花岗岩范围内(Pearce,1996)。

综上所述,矿区碱性侵入体的形成动力机制可能为西伯利亚板块和华北克拉通发生碰撞后伸展的产物。随之碰撞后应力松弛,逐渐传递到碰撞边界

的附近,并沿着赤城-尚义区域深大断裂。在地幔和下地壳的过渡部位,发生部分熔融,形成钙碱性岩石组合为主的水泉沟岩体,其形成过程可能比较漫长,并伴随着3次大的脉动。大约392~393 Ma之间,在矿区范围内有一次碱性岩浆入侵定位,形成了矿区的石英二长岩。随后,岩浆期后热液或后期碱性岩体的新一次脉动引起了区域广泛的金矿化。

5 结 论

(1) 根据锆石的形态特征以及稀土元素分布特征,均指示为岩浆成因。LA-MC-ICP-MS锆石测年结果表明,中山沟矿区新鲜和蚀变的角闪石英二长岩锆石U-Pb年龄在误差范围基本一致,年龄区间为388~395 Ma,为泥盆世,是区域水泉沟碱性杂岩的一部分,可能为水泉沟碱性杂岩第二期脉动的产物。

(2) 岩石地球化学分析结果表明,矿区碱性杂岩具有富SiO₂、富碱、准铝的钙碱性岩石,为相对低的Mg[#]的高钾钙碱性岩浆系列;岩体具有LREE、LILE元素(Sr、Rb、Ba)富集和高场强元素、放射性元素(Th、U)、HREE相对亏损特征,并伴随着弱负-正Eu异常,岩体类型为A2-型花岗岩。

(3) 岩体具有高Sr低Yb型花岗岩特征,呈现HREEs强烈亏损,弱负至正δEu异常,暗示源区有石榴子石+辉石±角闪岩组成,残留相为榴辉岩或角闪榴辉岩相。岩体源区可能为下地壳,并含有一定量的富集地幔的物质。

(4) 矿区碱性杂岩年代学、岩石学特征表明,碱性岩浆的侵位可能为西伯利亚板块和华北克拉通微地块发生碰撞后伸展的产物。结合矿区地质和前人研究成果,认为中山沟金矿床主要与泥盆世岩浆活动有关,是区域拉张构造背景下岩浆活动的产物。

致 谢 本课题工作得到了河北地质大学的张建珍教授、郭襄博士和张家口市海龙金矿有限公司的杨宝军、刘洪利、张小波以及李勇先生的热情指导与帮助,在此表示衷心感谢。

References

- Amelin Y and Davis W J. 2005. Geochemical test for branching decay of ¹⁷⁶Lu[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 69: 465-473.
- Bao Z W, Zhao Z H, Zhou L D and Zhou G F. 1996. An investigation

- into the petrogenesis of the Shuiquangou syenite complex, Northwest of Hebei Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 12(4): 562-572(in Chinese with English abstract).
- Bao Z W, Zhao Z H and Zhang P H. 2000. Genetic mechanism and diagenetic and metallogenic Age of Shuiquangou syenite complex in Northwest Hebei[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 19(4): 251-252(in Chinese with English abstract).
- Bao Z W, Zhao Z H, Zhang P H and Wang Y X. 2003. REE, Sr, Nd and Pb isotopic evidence for the petrogenesis of the Shuiquangou syenite complex in NW Hebei Province, China[J]. *Geological Review*, 49(6): 596-604(in Chinese with English abstract).
- Bao Z W and Zhao Z H. 2006. Isotopic geochemical constrains on metallogeny of the Dongping-type gold deposits associated with syenites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2534-2542(in Chinese with English abstract).
- Bao Z W, Sun W D, Li C J and Zhao Z H. 2014. U-Pb dating of hydrothermal zircon from the Dongping gold deposit in North China: Constrain on the mineralization processes[J]. *Ore Geology Reviews*, 61:107-119.
- Bao Z W, Li C J and Zhao Z H. 2016. Metallogeny of the syenite-related Dongping gold deposit in the northern part of the North China Craton: A review and synthesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 73:198-210.
- Bea F. 1996. Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal Protoliths; Implications for the chemistry of crustal melts[J]. *Journal of Petrology*, 37(3): 521-552.
- Bonham H F and Gilles D L. 1983. Epithermal gold/silver deposits: The geothermal connection[J]. *Geothermal Resources Council, Special Report*, 13:257-262.
- Chen C, Zhang F X, Wang F X, Niu S Y, Ma K, Wang Y J and Chu J. 2021. Zircon U-Pb chronology and Hf isotope of gold-bearing quartz veins in the Zhongshangou gold deposit, Hebei Province[J]. *Geological Review*, 67: 385-398(in Chinese with English abstract).
- Deng J F, Feng Y F, Liu C, Xiao Q H, Su S G, Zhou S and Gao Y G. 2009. Yanshanian (Jurassic-Cretaceous) orogenic processes, magma sources and metallogenesis as well as coal formation in the Taihangshan-Yanshan-West Liaoning Region[J]. *Geology in China*, 36(3): 623-633(in Chinese with English abstract).
- Ciobanu C L, Cook N J and Spry P G. 2006. Preface-special issue: Telluride and selenides minerals in gold deposits-how and why[J]? *Mineralogy and Petrology*, 87: 163-169.
- Claesson S, Vetrin V, Bayanova T and Downes H. 2000. U-Pb zircon age from a Devonian carbonatite dyke, Kola Peninsula, Russia: A record of geological evolution from the Archean to the Paleozoic[J]. *Lithos*, 51: 95-108.
- Cook N J and Ciobanu C L. 2001. Paragenesis of Cu-Fe ores from Ocna de Fier-Dognecea (Romania), typifying fluid plume mineralisation in a proximal skarn setting[J]. *Mineralogical Magazine*, 65: 351-372.
- Cook N J, Ciobanu C L, Spry P G and Voudouris P. 2009. Understanding gold - (silver) - telluride - (selenide) mineral deposits[J]. *Episodes*, 32(4): 249-263.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 26: 115-134.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20: 641-644.
- Fan G H, Li J W, Deng X D, Gao W S and Li S Y. 2021. Age and origin of the Dongping Au-Te deposit in the North China Craton revisited: Evidence from paragenesis, geochemistry, and in situ U-Pb geochronology of garnet[J]. *Econ. Geol.*, 116(4): 963-985.
- Frost B R, Barnes C G and Collins W J. 2001. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033-2048.
- Frost C D, Ramo O T and Dall A R. 2007. IGCP project 510: A-type granites and related rocks through time[J]. *Lithos*, 97(1-2): 7-13.
- Gao S, Luo T C, Zhang B R, Zhang H F, Han Y W, Zhao Z D and Hu Y K. 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(11), 1959-1975.
- Hebei Geology and Mineral Resources Bureau (3-rd geological Brigade). 1989. Report of the 1:50 000 regional geological survey of Xialiangjianfang sheet (K-50-111-A), Chongli sheet (K-50-111-B), Zhenningbao sheet (K-50-112-A)[R]. 1-100(in Chinese).
- Hebei Geology and Mineral Resources Bureau (3-rd geological Brigade). 1991. Report on exploration geology of Zhongshangou gold deposit, Changdi town, Chongli County, Hebei Province[R]. 1-117(in Chinese).
- Hoskin P W O. 2005. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3): 637-648.
- Hou K J, Li Y H, Zou T R, Qu X M, Shi Y R and Xie G Q. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications LA-MC-ICP-MS[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (10):2595-2604(in Chinese with English abstract).
- Hou K J, Li Y H and Tian Y R. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 28 (4):481-492(in Chinese with English abstract).
- Hu X D, Chen Z H and Zhao Y M. 1997. The metallogenetic epoch of the Xiaoyingpan gold deposit—The new material of U-Pb isotopic age on single zircon[J]. *Progress in Precambrian Research*, 20 (2): 22-28(in Chinese with English abstract).
- Jensen E P and Barton M D. 2000. Gold deposits related to alkaline magmatism. In: Hagemann S G and Brown P E, eds. *Gold in 2000*[J]. *Rev Economic Geology*, 13: 279-314.
- Jiang S H and Nie, F J. 1998. A comparison study on geological and geochemical features and ore genesis of the Xiaoyingpan and Dongping gold deposits, Hebei[J]. *Gold geology*, 46(6): 621-627 (in Chinese with English abstract).
- Jiang S H and Nie F J. 2000. ^{40}Ar - ^{39}Ar Geochronology of the Shuiquangou Alkaline Complex and Related Gold Deposits, Northwestern

- Hebei, China[J]. Geological Review, 46(6): 621-62(in Chinese with English abstract).
- Jiang S H and Nie F J. 2003. Nd-isotope constraints on origin of the Shuiquangou intrusive complex, north-western Hebei, China[J]. Geological Review, 49(4): 355-360(in Chinese with English abstract).
- Jiang N. 2005 Petrology and geochemistry of the Shuiquangou syenitic complex, northern margin of the North China Craton[J]. Journal of the Geological Society, London, 162: 203-215.
- Kusky T M and Li Jianghai. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton[J]. Journal of Asian earth sciences, 22 (4): 383-397.
- Li C J, Bao Z W, Zhao Z H, Zhao Z H and Qiao Y L. 2021. Zircon U-Pb age and Hf isotopic compositions of the granitic gneisses from the Sanggan complex in the Zhangjiakou area: Constraints on the early evolution of North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(4): 1057-1072(in Chinese with English abstract).
- Li C M, Deng J F, Chen L H, Deng L H, Su S G, Li H M, Hu S L and Liu X M. 2010a. Two periods of zircon from Dongping gold deposit in Zhangjiakou-Xuanhua area, northern margin of north China: Constrains on metallogenic chronology[J]. Mineral Deposits, 29(2):265-275(in Chinese with English abstract).
- Li C M, Deng J F, Su S G, Li H M and Liu X M. 2010b. Two stage zircon U-Pb ages of the potash altered rock in the Dongping gold deposit, Hebei Province, and their geological implications[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(6):843-852.
- Li C M, Li T, Deng J F, Su S G and Deng X M. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of the brittle-ductile shear zones in Hougou gold ore-field, northwestern Hebei Province[J]. Geotectonica et Metallogenia, 36(2): 157-167(in Chinese with English abstract).
- Li C X and Zhang Z. 1999. The geological characteristics of Zhongshangou gold deposit[J]. Journal of Hebei United University: Natural Science, 21:18-21.
- Li S Z, Meng H J, Li H Y and Zheng M. 1998. The mechanical analysis and ore control of Chongli Chicheng Shear Zone, northwestern Hebei Province[J]. Gold, 19(7): 7-12(in Chinese with English abstract).
- Lu S N, Li H K, Li H M, Yang C L, Hu Z D and Jiang M M. 1997. Basement characteristics and mineralization of gold concentrated areas: A case study of Xiaoqinling, northern Hebei and Jiabei gold concentrated areas[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-113(in Chinese).
- Luo Z K, Miao L C, Guang K, Qiu Y S, Qiu Y M, Mc Naughton N J and Groves D I. 2001. SHRIMP chronological study of Shuiquangou intrusive body in Zhangjiakou area, Hebei Province and its geochemical significance[J]. Geochimica, 30(2):116-122.
- Muller D and Groves D I. 1993. Direct and indirect associations between potassic igneous rocks, shoshonites and gold-copper deposits[J]. Ore Geology Review, 8: 383-406.
- Mutschler F E, Griffin M E and Stevens D S. 1984. Precious metal deposits related to alkaline rocks in the North American Cordillera[J]. Geol Soc Am Abstr Programs, 16: 606.
- Nasdala L, Hofmeister W G and Norberg N. 2008. Zircon M257: A Homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of Zircon[J]. Geoanalytical Research, 32: 247-265.
- Nie F J and Zhang H X. 1997. Alkaline magmatic activity and gold mineralization [J]. Mineral geology abroad, 3(81): 1-33(in Chinese).
- Nie Fengjun, Liu Yifei, Cao Yi, Zhang Weibo and Wang Fengxiang. 2014. Alkaline magmatism and Au-Cu-U mineralization in the northern North China Craton[R]. CAGS(in Chinese).
- Niu S Y, Sun A Q, Hao Z G, Wang B D, Ma B J, Zhang J Z and Wei M H. 2011. Multiple-stage evolution of mantle plume and its control of mineralization: Taking Zhangjiakou-Xuanhua mantle branch as an example[J]. Earth Science Frontiers, 6(4):553-568(in Chinese with English abstract).
- Nie F J and Zhang H X. 1997. Alkaline magmatic activity and gold mineralization[J]. Mineral geology abroad, 3(81): 1-33(in Chinese).
- Pearce J S. 1996. Sources and settings of granitic rocks[J]. Episodes, 19: 120-125.
- Richards, J R. 1995. Alkaline-type epithermal gold deposits-A review[J]. in: Thompson, J.F.H. ed, Magmas, fluids, and ore deposits, MAC Short Course, 23: 367-400.
- Shui Lansu. 2002. The research on geological-technical feature and mineral-control of Zhongshangou gold deposit[J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 24(2):128-131(in Chinese with English abstract).
- Song G X. 1991. A Gold deposit associated with alkali-complex rocks[J]. Geology and Prospecting, 27(8):1-8(in Chinese with English abstract).
- Song G R and Zhao Z H. 1996. Geology of Dongping alkaline complex gold deposit in Hebei Province[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-181(in Chinese).
- Song R X, Wang Y Z and Wang Z P. 2013. Zhangjiakou geological and mineral resources[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-188(in Chinese with English abstract).
- Sui Z M, Ge W C, Wu F Y, Zhang J H, Xu X C and Cheng R Y. 2007. Zircon U-Pb ages, geochemistry and its petrogenesis of Jurassic granites in northeastern part of the Da Hinggan Mts[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 461-480.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J eds. [M]. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, Special Publication. 42: 313-345.
- Thornton C P and Tuttle O F. 1960. Chemistry of igneous rocks. 1. Differentiation index[J]. American Journal of Science, 258:664-684.
- Vervoort J D and Patchett P J. 1996. Behavior of hafnium and neodymium isotopes in the crust: Constraints from Precambrian crustally derived granites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60(19): 3717-3733.
- Wakita H, Rey P and Schmitt R A. 1971. Abundances of the 14 rare-earth elements and 12 other trace elements rocks and four soils[M].

- Proceedings of the Lunar Science Conference. 2nd: 1319-1329
- Wang B D, Niu S Y, Sun A Q and Zhang J Z. 2010. Deep ore source and mantle branch structure mineralization. Beijing: Geological Publishing House, 1-256(in Chinese with English abstract).
- Wang F X, Sun A Q, Pei R F, Liu Y F and Jiang S H. 2016. Geological, geochemical characteristics and the genetic mechanism of the Zhuanshanzi gold deposit in Inner Mongolia, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(8): 1798-1816(in Chinese with English abstract).
- Wang F X, Pei R F, Jiang S H, Qiu H Y, Liu Y F and Zhao Y Y. 2017. The progress in the study of Cu-Au(Mo) deposits related to alkaline rocks[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(1): 140-153(in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Zhao Z H and Xiong X L. 2000. The ascertainment of Late-Yanshanian A-type granite in Tongbai-Dabie Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 19(4): 297-306(in Chinese with English abstract).
- Wang R R. 1992. The characteristics and genesis of the felsic alkali complex, Jinjiazhuang, Hebei[J]. *Journal of Guilin Institute of Geology*, 12: 12-20(in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Jiang X M and Shang M Y. 1994. The geological characteristics and origin of gold deposits related to subalkaline rocks in northern Hebei Province[J]. *Geological Review*, 40: 368-376(in Chinese with English abstract).
- Wang Z K, Jiang X M, Wang Y and Shang M Y. 1992. Origin and forming mechanism of Shuiquangou subalkali complex in Zhangjiakou-Xuanhua area, Hebei[J]. *Journal of Metallic Geology*, 1(1): 18-26(in Chinese with English abstract).
- Wei J Y and Su Q. 1994. Geochemistry characteristics of Shuiquangou rock body in Dongping gold ore district, Hebei Province[J]. *Scientifica Geologica Sinica*, 29(3), 256-266. (in Chinese with English abstract).
- Wei Z L, Zhang H, Liu X M and Zhang H Q. 2008. La-ICP-MS dating of volcanic rocks of the Zhangjiakou Formation in Zhangjiakou area and its geological significance[J]. *Progress in Natural Science*, 18(5): 523-530(in Chinese).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407-419.
- Wu F Y, Li X H, Yang J H and Zheng Y F. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217-1238(in Chinese with English abstract).
- Wu S S, Zhao S, Niu S Y, Wang B D, Sun A Q, Li F and Yang B J. 2009. Analyse on ore-formation in deep part of Zhongshangou gold deposit in Chongli County, Hebei Province[J]. *Gold Science and Technology*, 17(1): 6-9(in Chinese with English abstract).
- Xu B L, Yan G H, Zhang C, Li Z T and He Z F. 1998. Petrological Subdivision and source material of A-type granites[J]. *Earth Science Frontiers*(China University of Geosciences, Beijing), 5: 113-124 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Wang Y, Li C D, Jin W J and Jia X Q. 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249-2269(in Chinese with English abstract).
- Zhang Q and Li C D. 2012. Granites: Geodynamic significance[M]. Beijing: China Ocean Press. 1-276(in Chinese with English abstract).
- Zhang X H and Zhai M G. 2010. Magmatism and its metallogenetic effects during the Paleozoic continental crustal construction in northern North China: An overview[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1329-1341(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C. 1997. The isotopic geochemical characteristics and its petrogenesis of the Shuiquangou complex, North Hebei[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 27(1): 36-43(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C and Wang Y Q. 1997. Indosinian alkaline magmatism in North Hebei Province and its geodynamic significance[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 16(4): 214-217(in Chinese with English abstract).
- Zha Z J. 2020. Geological and geochemical characteristics and genesis of the Zhongshangou gold deposit in northwest Hebei Province[D]. Mentor: Liu Jiajun, Zhen Shimin. China University of Geosciences (Beijing). 1-67(in Chinese with English abstract).
- Zhen S M, Zha Z J, Wang D Z, Liu J J, Pang Z S, Cheng Z Z, Xue J L, Wang J, Bai H J, Li Y and Chen C. 2020. Characteristics of ore-forming fluids of the Zhongshangou gold deposit, Zhangjiakou-Xuanhua area, Hebei Province, and its limitation on the intrusive rock related telluride-gold deposits[J]. *Geology in China*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20200824.1658.004.html> (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 包志伟, 赵振华, 周玲棣, 周国富. 1996. 冀西北水泉沟正长岩杂岩体的成因[J]. *岩石学报*, 12(4): 562-572.
- 包志伟, 赵振华, 张佩华. 2000. 冀西北水泉沟正长岩杂岩体成因机制及成岩成矿时代探讨[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 19(4): 251-252.
- 包志伟, 赵振华, 张佩华, 王一先. 2003. 张家口水泉沟正长岩杂岩体成因的REE和Sr、Nd、Pb同位素证据[J]. *地质论评*, 49(6): 596-604.
- 包志伟, 赵振华. 2006. 东坪式与正长岩类有关的金矿床成矿机理的同位素地球化学制约[J]. *岩石学报*, 22(10): 2534-2542.
- 陈超, 张福祥, 王丰翔, 牛树银, 马奎, 王云静, 楚洁. 2021. 河北中山沟金含金石英脉中锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素研究[J]. *地质论评*, 67(2): 385-398.
- 邓晋福, 冯艳芳, 刘翠, 肖庆辉, 苏尚国, 周肃, 高延光. 2009. 太行-燕山地区燕山期造山过程、岩浆源区与成矿作用[J]. *中国地质*, 36(3): 623-633.
- 河北省地质矿产局第三地质大队(河北地矿三队). 1989. 下两间房幅(K-50-111-A)、崇礼幅(K-50-111-B)、镇宁堡幅(K-50-112-A) 1: 50 000 区域地质调查报告[R]. 1-100.
- 河北省地质矿产局第三地质大队(河北地矿三队). 1991. 河北省崇

- 礼县场乡中山沟金矿勘探地质报告[R]. 1-117.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 23(10):2595-2604.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4):481-492.
- 胡小蝶, 陈志红, 赵彦明. 1997. 河北小营盘金矿成矿时代—单颗锆石 U-Pb 同位素年龄新证据[J]. 前寒武纪研究进展, 20(2):22-28.
- 江思宏, 聂凤军. 1998. 河北小营盘与东坪金矿地质地球化学特征对比及矿床成因探讨[J]. 黄金地质, 4(4):12-24.
- 江思宏, 聂凤军. 2000. 冀西北水泉沟杂岩体及其有关金矿床的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素年代学研究[J]. 地质论评, 46(6):621-627.
- 江思宏, 聂凤军. 2003. 冀西北水泉沟杂岩体成因的 Nd 同位素证据[J]. 地质论评, 49(4): 355-360.
- 李昌存, 张增. 1999. 中山沟金矿床地质特征[J]. 河北联合大学学报: 自然科学版, 21: 18-21.
- 李长民. 1999. 东坪金矿金质来源与张宣地区花岗岩-绿岩地体的关系探讨[J]. 前寒武纪研究进展, 22(1):40-46.
- 李长民, 邓晋福, 陈立辉, 苏尚国, 李惠民, 胡森林, 刘新秒. 2010a. 华北北缘张宣地区东坪金矿中的两期锆石:对成矿年龄的约束[J]. 矿床地质, 29(2): 265-275.
- 李长民, 邓晋福, 苏尚国, 李惠民, 刘新秒. 2010b. 河北省东坪金矿矿质蚀变岩中的两期锆石年代学研究及意义[J]. 地球学报, 31(6): 843-852.
- 李长民, 李拓, 邓晋福, 苏尚国, 刘新秒. 2012. 冀西北后沟金矿田脆韧性剪切带年代学新证据:来自 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的发现[J]. 大地构造与成矿学, 36(2):157-167.
- 李长民, 邓晋福, 苏尚国, 刘翠, 刘新秒. 2014. 冀北水泉沟岩体西段锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素研究[J]. 岩石学报, 30(11): 3301-3314.
- 李创举, 包志伟, 赵振华, 乔玉楼. 2012. 张家口地区桑干杂岩中花岗岩片麻岩的锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素特征及其对华北克拉通早期演化的制约[J]. 岩石学报, 28(4): 1057-1072.
- 李少众, 孟海军, 李怀勇, 郑美. 1998. 冀西北崇礼-赤城剪切带的力学分析及其控矿作用[J]. 黄金, 19(7):7-12.
- 罗镇宽, 苗来成, 关康, 裴有守, Qiu Y M, Mc Naughton N J, Groves D I. 2001. 河北张家口水泉沟岩体 SHRIMP 年代学研究及其意义[J]. 地球化学, 30(2):116-122.
- 陆松年, 李怀坤, 李惠民, 杨春亮, 胡正德, 蒋明媚. 1997. 金矿床密集区的基底特征及成矿作用研究—以小秦岭、冀北和胶北金矿密集区为例[M]. 北京:地质出版社. 1-113.
- 聂凤军, 张辉旭. 1997. 碱性岩浆活动与金矿作用[J]. 国外矿床地质, 3(81): 1-33.
- 聂凤军, 刘翼飞, 曹毅, 张伟波, 王丰翔. 2014. 华北克拉通北部碱性岩浆活动与金、铜和钼成矿作用[R]. 中国地质科学院矿产资源研究所.
- 牛树银, 孙爱群, 郝梓国, 王宝德, 马宝军, 张建珍, 魏明辉. 2011. 地幔热柱多级演化及其成矿控矿研究:以张-宣幔枝构造研究为例[J]. 地学前缘, 18(2): 258-267.
- 水兰素. 2002. 中山沟金矿地质构造特征及控矿[J]. 河北理工学院学报, 24(2):128-131.
- 宋官祥. 1991. 一个与碱性杂岩体有关的金矿床—冀北东坪金矿[J]. 地质与勘探, 27(8):1-8.
- 宋国瑞, 赵振华. 1996. 河北省东坪碱性杂岩金矿地质[M]. 北京:地质出版社. 1-181.
- 宋瑞先, 王有志, 王振彭. 2013. 张家口地质矿产[M]. 北京:地质出版社. 1-188.
- 隋振民, 葛文春, 吴福元, 张吉衡, 徐学纯, 程瑞玉. 2007. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗质岩石的锆石 U-Pb 年龄, 地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 23(2): 461-480.
- 王宝德, 牛树银, 孙爱群, 张建珍. 2010. 深部矿源与幔枝构造成矿[M]. 北京:地质出版社. 1-256.
- 王丰翔, 孙爱群, 裴荣富, 刘翼飞, 江思宏. 2016. 内蒙古撰山子金矿床地质, 地球化学特征及成因研究[J]. 地质学报, 90(8): 1798-1816.
- 王丰翔, 裴荣富, 江思宏, 邱慧远, 刘翼飞. 2017. 赵元艺. 碱性岩相关铜-金(钼)矿床的研究进展[J]. 地质通报, 36(1):140-153.
- 王强, 赵振华, 熊小林. 2000. 桐柏-大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘定[J]. 岩石矿物学杂志, 19(4): 297-306.
- 王蓉嵘. 1992. 河北金家庄地区长英质碱性岩的特征及成因[J]. 桂林地质学院学报, 12(1): 12-20.
- 王郁, 蒋心明, 商木元. 1994. 冀西北与偏碱性岩有关的金矿床地质特征及成因[J]. 地质论评, 40(4):368-376.
- 王正坤, 蒋心明, 王郁, 商木元. 1992. 河北省张宣地区水泉沟偏碱性杂岩体的起源和形成机制及地质意义[M]. 贵金属地质. 3: 18-26.
- 魏菊英, 苏琪. 1994. 河北东坪金矿区水泉沟岩体的地球化学特征[J]. 地质科学, 29(3): 256-266.
- 韦忠良, 张宏, 柳小明, 张晔卿. 2008. 张家口地区张家口组火山岩的 LA-ICP-MS 测年及其地质意义[J]. 自然科学进展, 18(5):523-530.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1217-1238.
- 吴珊珊, 赵莎, 牛树银, 王宝德, 孙爱群, 李富, 杨宝军. 2009. 河北省崇礼县中山沟金矿深部成矿分析. 黄金科学技术, 17(1):6-9.
- 许保良, 阎国翰, 张臣, 李之彤, 何中甫. 1998. A 型花岗岩的岩石学亚类及其物质来源[J]. 地学前缘, 5: 113-124.
- 张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(9):2249-2269.
- 张旗, 李承东. 2012. 花岗岩:地球动力学意义[M]. 北京:海洋出版社. 1-276.
- 张晓晖, 翟明国. 2010. 华北北部古生代大陆地壳增生过程中的岩浆作用与成矿效应[J]. 岩石学报, 26(5):1329-1341.
- 张招崇. 1997. 冀北水泉沟杂岩体的同位素地球化学特征及其成因意义[J]. 长春地质学院学报, 27(1):36-43.
- 张招崇, 王永强. 1997. 冀北印支期碱性岩浆活动及其地球动力学意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 16(4):214-217.
- 查钟健. 2020. 冀西北中山沟金矿床地质地球化学特征及矿床成因探究[D]. 导师:刘家军, 甄世民. 北京:中国地质大学. 67页.
- 甄世民, 查钟健, 王大钊, 刘家军, 庞振山, 程志中, 薛建玲, 王江, 白海军, 李阳, 陈超. 2020. 河北张宣地区中山沟金矿成矿流体特征及其对侵入岩型碲金矿床的限定[J]. 中国地质. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20200824.1658.004.html>.