

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.259>



华北克拉通怀安杂岩中早前寒武纪两期变质表壳岩的重新厘定:岩石学及锆石 U-Pb 年代学证据

张家辉^{1,2}, 田 辉^{1,2}, 王惠初^{1,2}, 施建荣^{1,2}, 任云伟^{1,2}, 初 航^{1,2},
常青松^{1,2}, 钟 炎^{1,2}, 张 阔^{1,2}, 相振群^{1,2}

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

2. 中国地质调查局前寒武纪地质研究中心, 天津 300170

摘要: 华北克拉通怀安杂岩中早前寒武纪变质表壳岩具有变质程度深(麻粒岩相)、连续性差、变形及构造置换强烈等特征, 地层划分及形成时代一直存在较大争议。通过详细的地质调查、岩石学及年代学研究, 新厘定出新太古代柔干岩群铁英岩岩组、石榴黑云片麻岩岩组以及古元古代集宁岩群黄土窑岩组石榴高压基性麻粒岩一大理岩岩段和含石墨矽线石榴片麻岩一变粒岩一大理岩岩段 4 套变质表壳岩单元, 并建立了相应的岩石学识别标志。新太古代变质表壳岩一般呈透镜体或带状体产出, 于新太古代变质深成岩中, 且锆石年龄存在~2.5 Ga 和~1.8 Ga 两个峰值。铁英岩岩组原岩为一套基性火山岩夹磁铁石英岩建造, 产出阿尔戈马型 BIF 铁矿, 形成年龄为 2 489±19 Ma; 石榴黑云片麻岩岩组主体岩石为条带状石榴黑云斜长片麻岩, 原岩为杂砂岩建造, 物源来自新太古代 TTG 岩石。古元古代石榴高压基性麻粒岩一大理岩岩段原岩为一套基性火山岩夹大理岩建造, 形成年龄早于~2.03 Ga; 含石墨矽线石榴片麻岩一变粒岩一大理岩岩段野外呈带状构造岩片体产出, 连续性较好, 为一套“有层无序”的孔兹岩组合, 碎屑锆石年龄介于 2.30~1.99 Ga, 与区域上孔兹岩年龄结构一致, 形成时代为古元古代晚期(1.99~1.95 Ga)。新太古代和古元古代变质表壳岩均卷入古元古代末期的造山过程(1.95~1.80 Ga), 遭受麻粒岩相变质与变形作用。区内孔兹岩可能是造山过程卷入的构造岩片。本研究进一步明确了晋冀蒙交界地区存在与孔兹岩不同的新太古代陆源碎屑岩和古元古代洋壳残片, 这对重新认识本区早前寒武纪地质演化具有重要意义。

关键词: 华北克拉通; 怀安杂岩; 孔兹岩; BIF; 锆石 U-Pb 定年; 早前寒武纪; 岩石学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2019)01-001-22

收稿日期: 2018-04-29

Re-Definition of the Two-Stage Early-Precambrian Meta-Supracrustal Rocks in the Huai'an Complex, North China Craton: Evidences from Petrology and Zircon U-Pb Geochronology

Zhang Jiahui^{1,2}, Tian Hui^{1,2}, Wang Huichu^{1,2}, Shi Jianrong^{1,2}, Ren Yunwei^{1,2}, Chu Hang^{1,2},
Chang Qingsong^{1,2}, Zhong Yan^{1,2}, Zhang Kuo^{1,2}, Xiang Zhenqun^{1,2}

1. *Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China*

2. *Pre-Cambrian Geological Research Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China*

Abstract: The Early-Precambrian meta-supracrustal rocks in the Huai'an Complex of the North China Craton are characterized by high-grade metamorphism (granulite-facies), poor continuity, strong deformation and structural transposition, etc. Division

基金项目: 中国地质调查局地质调查二级项目(No.DD20160042)。

作者简介: 张家辉(1986—), 男, 助理研究员, 主要从事早前寒武纪地质及早期地壳演化研究。ORCID: 0000-0003-1812-5752。

E-mail: zhangjiahuijd@163.com

引用格式: 张家辉, 田辉, 王惠初, 等, 2019. 华北克拉通怀安杂岩中早前寒武纪两期变质表壳岩的重新厘定: 岩石学及锆石 U-Pb 年代学证据. 地球科学, 44(1): 1~22.

of the stratigraphic units and their formation ages are still controversial. Through detailed geological survey, petrology and geo-chronological studies, four meta-supracrustal rock assemblages are newly defined, which are the Neoarchean Sanggan Group magnetite-quartzite Formation (MQF), garnet-biotite-plagiogneiss Formation (GBPF) and Paleoproterozoic Jining Group amphibolites marble Formation (AMF), graphite-sillimanite-garnet gneiss Formation (GSGF). Their corresponding petrological marks are also established. Field investigation reveals that the Neoarchean meta-supracrustal rocks usually appear as lenticular inclusions or banded sheet outcropped in the Neoarchean metamorphic plutonites, and the zircon age shows two peaks at ~ 2.5 Ga and ~ 1.8 Ga. The protolith of the MQF is a suite of basic volcanic rocks with magnetite quartzite, which produced Algoma-type BIF iron ore and formed at 2489 ± 19 Ma. The main rock type of GBPF is banded garnet-biotite-plagiogneiss and its protolith is greywacke, indicating that they originated from the Neoarchean TTG rocks. The protolith of the Paleoproterozoic AMF is a suite of basic volcanic rocks intercalated with marble, which formed earlier than ~ 2.03 Ga. The GBPF, which is a suite of Khondalite, presents ribbon-like tectonic slices field outcrops and is characterized by good continuity and stratified but disordered structure. The detrital zircon age of the GBPF ranges from 2.30 to 1.99 Ga, which is regionally consistent with the age of the Khondalite, while its formation age is Late Paleoproterozoic (1.99–1.95 Ga). The Neoproterozoic and Paleoproterozoic meta-supracrustal rocks were all involved by the Late Paleoproterozoic orogeny (1.95–1.80 Ga) and underwent granulite-facies metamorphism and deformation. The Khondalites may be exotic tectonic slices during the Late Paleoproterozoic orogeny. This study clarifies that Neoarchean continental clastic rock and Paleoproterozoic oceanic crust exist at the border of Shanxi, Hebei, and Inner Mongolia provinces, which are different from the Khondalites. This may shed light on a new understanding of the geologic evolution of the Early Precambrian Huai'an Complex of the North China Craton.

Key words: North China Craton; Huai'an Complex; khondalite; BIF; zircon U-Pb dating; Early Precambrian; petrology.

晋冀蒙交界地区早前寒武纪岩石大致以大同—兴和一线为界划分为两套高级变质岩系,分别为南东部麻粒岩系和北西部孔兹岩系(阎月华和刘文军,1996)(图 1)。孔兹岩系主要分布在贺兰山—千里

山—乌拉山—大青山—集宁一线,近东西延伸600 km,南北宽100~200 km,为一套特殊的含石墨、矽线石和石榴石的麻粒岩相变泥质岩组合,主要岩石类型包括石墨矽线石榴斜长/二长片麻岩、(石

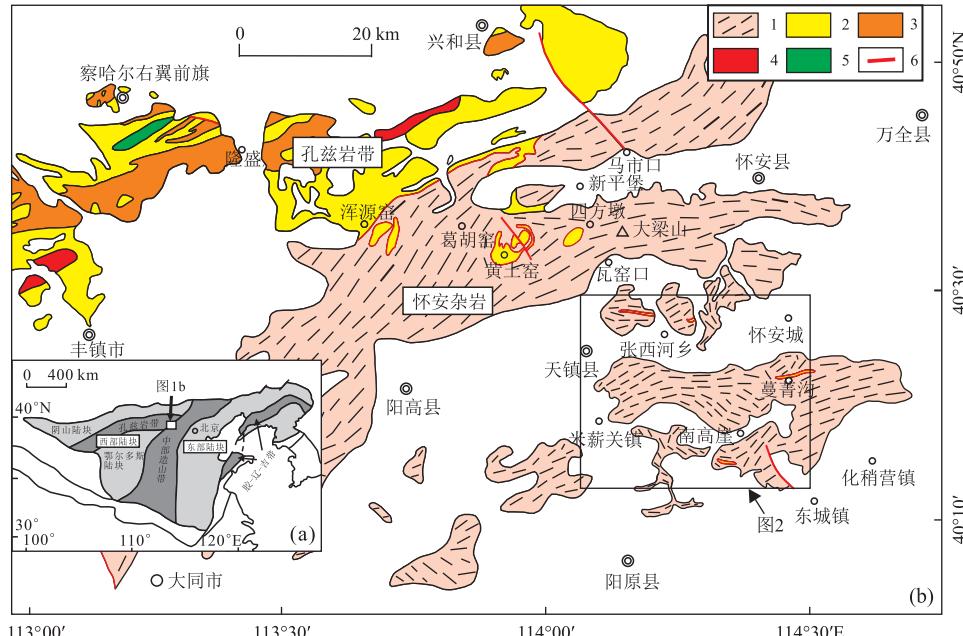


图 1 华北克拉通构造区划图(a)和晋冀蒙交界地区早前寒武纪地质简图(b)

Fig.1 Tectonic subdivision of the North China Craton (a) and Precambrian geological sketch of the border area of Shanxi, Hebei, Inner Mongolia provinces (b)

图 a 据 Zhao et al. (2005) 修改.1.早前寒武纪变质杂岩基底(怀安杂岩);2.孔兹岩系;3.似斑状石榴二长(花岗)片麻岩;4.古元古代白岗岩;5.古元古代变质基性岩墙;6.断层或构造接触界线

墨)石榴变粒岩/浅粒岩、长石石英岩以及大理岩等,并伴生同构造S型花岗岩产出(卢良兆等,1996).该套岩石在集宁—丰镇—凉城一带出露最为典型,被称为集宁群(李璞和钟富道,1965).长久以来,华北克拉通西北部的孔兹岩被认为是中太古代或新太古代变质岩系(沈其韩等,1989,1996;刘宇光,1989;赵宗溥,1993;卢良兆等,1996;Qian and Li, 1999; Li *et al.*, 2000;杨振升等,2000),但近年来对大青山、集宁等地孔兹岩进行的锆石U-Pb定年结果表明,碎屑锆石年龄主要集中于2.0~2.3 Ga之间,并经历了1.95~1.85 Ga变质作用(吴昌华等,2006;Wan *et al.*, 2006;Dong *et al.*, 2007, 2013; Yin *et al.*, 2009, 2011; Peng *et al.*, 2014;蔡佳等,2015; Wang *et al.*, 2015; Cai *et al.*, 2017),孔兹岩的成岩时代为古元古代晚期(2.00~1.95 Ga),而非太古代.

麻粒岩系主要分布在大同一天镇—怀安—宣化一带,在早期的地质工作中被笼统地称为桑干片麻岩或桑干杂岩,并在随后开展的1:20万区调工作中被当作变质地层处理,划归为桑干群,形成时代为太古代.直至20世纪80年代,晋冀蒙交界地区的早前寒武纪高级变质岩区逐步建立起以太古代英云闪长质—奥长花岗质—花岗闪长质片麻岩(TTG片麻岩)或灰色片麻岩杂岩为主体的地质格架,变质表壳岩呈层状包体零星“漂浮”在片麻岩杂岩中(刘宇光和郭敬辉,1993).该套片麻岩杂岩被称为怀安杂岩(刘宇光,1989),其中的变质表壳岩部分归属于马市口群(赵宗溥,1993)或集宁群孔兹岩(卢良兆等,1996),形成时代被认为是新太古代.随后,在天镇—怀安一带开展的1:25万和1:5万区调工作对区内变质表壳岩进行了不同划分,建立了阳高岩组、黄土窑岩组、右所堡岩组以及马市口岩组等地层单位,且变质表壳岩的形成时代存在古太古代、新太古代和古元古代等不同认识.最近的锆石U-Pb年代学研究表明,怀安杂岩中兴和黄土窑、天镇四方墩以及怀安蔓菁沟等地的变泥质表壳岩中的碎屑锆石年龄同样集中在2.0~2.3 Ga之间,并记录了1.80~1.95 Ga多期变质事件(Xia *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2010; 蔡佳等,2017),其岩石组合和年龄格架与孔兹岩一致,为古元古代变质表壳岩.

晋冀蒙交界地区麻粒岩相TTG片麻岩中变质地层出露规模小,具有高级区变质程度深、构造复杂、受到普遍混合岩化干扰等特征,构成地层的连续性较差,客观上造成各地区之间地层划分和对比研究的困难(赵宗溥,1993).不同学者对本区变质地层

的划分及形成时代存在不同认识,并且对于是否存在太古代变质表壳岩争议较大.近两年来,笔者在天镇—怀安地区开展了新的1:5万填图工作,通过详细的野外地质调查、岩石学对比以及锆石U-Pb年代学研究,对区内早前寒武纪变质基底的构造岩石单元进行了重新划分,新厘定出新太古代和古元古代4套具有不同成因性质的变质表壳岩单元,并建立了相应的岩石学识别标志.本文的研究还进一步明确了天镇—怀安地区存在与古元古代孔兹岩不同的新太古代陆源碎屑岩和古元古代洋壳残片,这对重新认识本区早前寒武纪地质演化具有重要意义.

1 区域地质概况及早前寒武纪地层划分沿革

1.1 区域地质概况

华北克拉通早前寒武纪变质基底主要由太古代花岗片麻岩杂岩、绿岩带以及古元古代变质火山—沉积岩系、花岗质岩浆岩等构成(Zhao *et al.*, 2005),并在鞍山地区保存有古老的始太古代陆核(张家辉等,2018),其中~2.5 Ga TTG岩系及花岗岩组合分布范围广,构成了华北克拉通的主体格架.研究区位于怀安杂岩中的天镇—怀安一带,大地构造位置属华北克拉通中部造山带北段(图1a),在地质结构组成上具有典型“二元结构”,即广泛出露的早前寒武纪变质基底和中元古代以来的稳定沉积盖层(图2).变质基底主体为新太古代麻粒岩相一角闪岩相石英闪长质—英云闪长质—花岗闪长质—奥长花岗质—二长花岗质片麻岩杂岩(2.55~2.45 Ga; Zhao *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2009, 2012; Wang *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2012; 魏颖等,2013; Su *et al.*, 2014),出露面积占基底总面积的80%以上,其余为古元古代二长花岗岩类、变质基性岩墙(二辉麻粒岩)以及零星出露的条带状磁铁石英岩(BIF)、石榴黑云斜长片麻岩、含石墨富铝片麻岩、大理岩等具有表壳岩性质的岩石类型,这些表壳岩是区内铁矿和石墨矿的主要产出层位.区内的岩石类型特征为具有退变“白眼圈”结构的石榴高压基性麻粒岩,矿物学记录了峰期高压麻粒岩相和后期麻粒岩相一角闪岩相退变质作用过程,并具有顺时针P-T演化轨迹(郭敬辉等,1993; Guo *et al.*, 2002, 2005; Zhang *et al.*, 2016; 沈其韩等,2018).大量年代学研究表明,区内变质基底岩石均记录了1.85~1.81 Ga主期

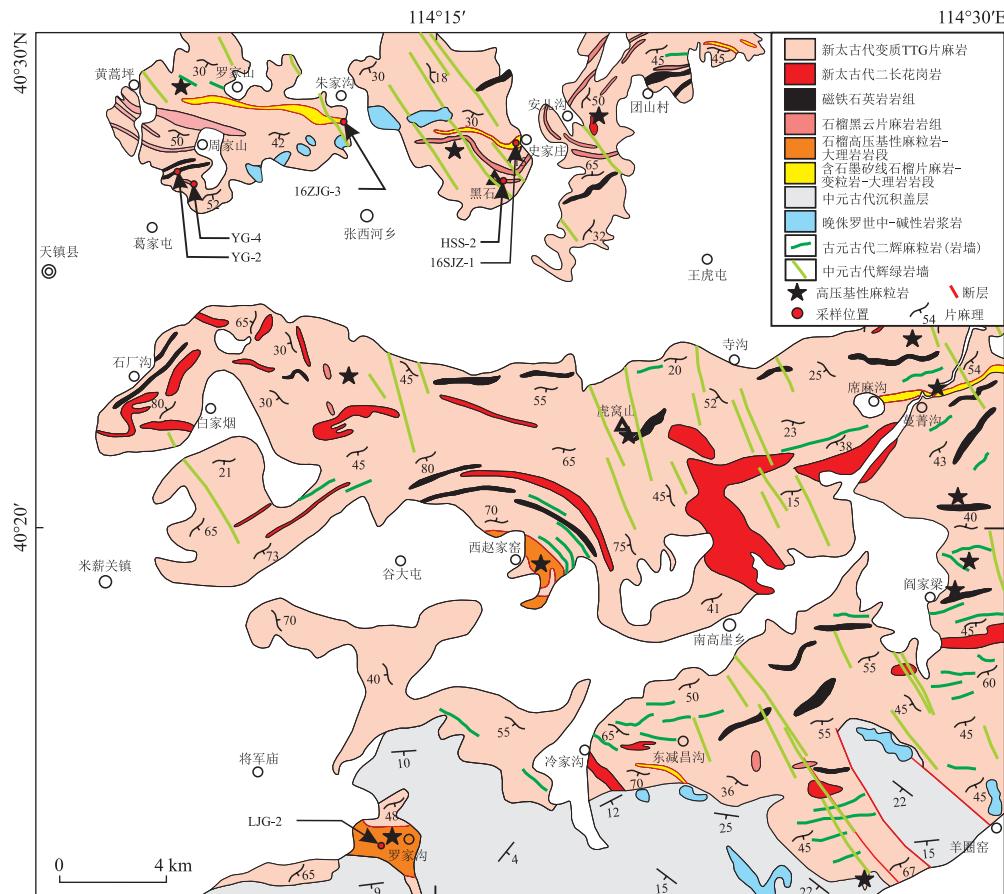


图 2 天镇-怀安地区地质简图以及采样位置

Fig.2 Geological sketch of the Tianzhen-Huai'an area and the sampling position in this study

变质事件,被认为代表了西部陆块和东部陆块碰撞形成统一的华北克拉通基底的构造过程(Zhao *et al.*, 2005, 2008, 2010; Liu *et al.*, 2009, 2012; Wang *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2012; 魏颖等, 2013; Su *et al.*, 2014; 蔡佳等, 2017; 魏春景, 2018).古元古代末期未变质花岗伟晶岩脉的侵位(1 795~1 806 Ma, Wang *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2014),标志着古元古代造山事件的结束。

中元古代早期开始,本区及邻区大规模出露产状陡立的未变质的辉绿/辉长岩墙,走向呈北西-南东向($300^\circ \sim 340^\circ$)(图 2),出露宽度一般为 20~50 m,沿走向延伸 2~5 km,部分产出较好的基性岩墙可作为石材开采。中元古代晚期,在研究区南部沉积高于庄组和大红峪组一套陆表海碎屑岩-碳酸盐岩,并具明显的台型沉积特点,在野外表现为较平缓的角度不整合覆盖于早前寒武纪变质基底之上。已有研究表明,中元古代大规模的镁铁质岩墙群(1.77~1.78 Ga; 彭彭等, 2004; Wang *et al.*, 2014a)、非造山岩浆活动(包括大庙斜长岩杂岩,

1 693~1 715 Ma, 赵太平等, 2004; 密云-丰宁环斑花岗岩, ~1 680 Ma, 杨进辉等, 2005; 龙王幢 A 型正长花岗岩, ~1 625 Ma, 陆松年等, 2003)以及裂陷槽火山-沉积事件(燕辽、熊耳和白云鄂博裂陷槽, Lu *et al.*, 2008)一起代表华北克拉通进入了造山后伸展或超大陆裂解的演化阶段。区内缺失古生代地质记录,直到晚侏罗世,开始出现少量岩株状或脉状中-碱性岩浆岩的侵位,在局部形成铅锌银等多金属矿点,并可见金矿化点。随后,在晚白垩世发育少量沉积地层。中-新生代构造强烈,在区内发育大量的断层构造,并形成大型山间盆地,沉积以马兰黄土为代表的黄土地层。

1.2 晋冀蒙交界地区早前寒武纪地层划分及研究沿革

20世纪60年代以前,区内早前寒武纪深变质岩多被笼统归属于桑干片麻岩、桑干系或桑干杂岩(赵宗溥, 1954; 孙云铸, 1959; 王启超, 1959)。在随后开展的一系列 1:20 万区域地质调查中,采用群、组、段传统地层划分方法对区内早前寒武纪变质地

1:20万区调				华北区域地层表⑤		董启贤和周俊昌(1984)		内蒙古自治区地质志⑥		山西省地质志⑦		内蒙古第二代地层表⑧		赵宗溥(1993)		内蒙古古岩层⑨		中国地层典⑩		1:5万阳高测区⑪		Qian et al.(1999)		1:25万张家口市幅⑫		1:5万天镇测区矿调⑬		1:25万大同市幅⑭		本文	
太古代	张家口幅①	大同幅②	天镇幅③	集宁幅④	大岩组	东沟村组	沙渠村组	第二岩组	上集宁群	下白窑群	新太古代集宁群	中太古代集宁群	黄土窑岩组	下白窑组	中太古代集宁群	中太古代集宁群	新太古代丰镇群	古元古代集宁岩群	所岩组	中太古代崇礼岩群	黄土窑岩组	古元古代集宁岩群	黄土窑岩组	含石墨石榴片麻岩岩段	含石墨石榴片麻岩岩段	古元古代集宁岩群	黄土窑岩组	含石墨石榴片麻岩岩段	含石墨石榴片麻岩岩段		
	黄土窑组	黄土窑岩组	桑干群	桑干群	砂线榴片岩组	下白窑组	古太古代	第一岩组	中一下太古代集宁群	大石沟组	兴和群	马市口群	阳高岩组	右所堡组	古太古代桑干群	中太古代桑干群	新太古代	右所堡组	中太古代	阳高岩组	新太古代	阳高岩组	新太古代	石榴黑云片麻岩岩组	石榴黑云片麻岩岩组	新太古代桑干岩群	磁铁石英岩组	石榴黑云片麻岩岩组	石榴黑云片麻岩岩组		
	桑干群	下段	右所堡组	下段	砂线榴片岩组	下白窑组	下段	下集宁群	下集宁群	右所堡组	兴和群	马市口群	阳高岩组	右所堡组	新太古代桑干群	中太古代桑干群	新太古代	右所堡组	中太古代	阳高岩组	新太古代	阳高岩组	新太古代	石榴黑云片麻岩岩组	石榴黑云片麻岩岩组	新太古代桑干岩群	磁铁石英岩组	石榴黑云片麻岩岩组	石榴黑云片麻岩岩组		
	崇礼岩组	葛胡窑岩组	上段	上段	大石沟组	大石沟组	右所堡组	右所堡组	右所堡组	右所堡组	早太古代兴和群	中太古代桑干群	阳高岩组	右所堡组	古太古代桑干群	新太古代桑干群	古太古代	右所堡组	中太古代	阳高岩组	新太古代	阳高岩组	新太古代	石榴黑云片麻岩岩组	石榴黑云片麻岩岩组	新太古代桑干岩群	磁铁石英岩组	石榴黑云片麻岩岩组	石榴黑云片麻岩岩组		
	下白窑组	葛胡窑岩组	下段	下段	右所堡组	右所堡组	瓦窑口组	瓦窑口组	瓦窑口组	瓦窑口组	马市口群	马市口群	马市口组	马市口组	马市口组	马市口组	马市口组	马市口组	马市口组	马市口组	马市口组	马市口组	马市口组	石榴黑云片麻岩岩组	石榴黑云片麻岩岩组	新太古代桑干岩群	磁铁石英岩组	石榴黑云片麻岩岩组	石榴黑云片麻岩岩组		
	马市口组																														

图3 晋冀蒙交界地区早前寒武纪变质地层划分沿革

Fig.3 Division history of Early Precambrian metamorphic stratigraphy at the border of Shanxi, Hebei, and Inner Mongolia provinces

①河北省区域地质测量大队,1967,1:20万张家口幅地质图说明书;②山西省区域地质测量大队,1969,1:20万大同幅地质图说明书;③河北省区域地质测量大队,1970,1:20万天镇幅地质图说明书;④内蒙古自治区地质局,1972,1:20万集宁幅区域地质测量报告;⑤内蒙古自治区地层表编写组(1978);⑥内蒙古自治区地质矿产局(1985);⑦山西省地质矿产局(1989);⑧沈鸿章,1990,内蒙古第二代地层表;⑨内蒙古自治区地质矿产局(1996);⑩沈其韩等(1996);⑪山西省地质矿产局区调队,1996,1:5万阳高测区区域地质调查报告;⑫河北省地质调查院区调所,2008,1:25万张家口市幅区域地质调查报告;⑬山西省地质调查院,2014,1:5万天镇测区地质报告;⑭山西省地质调查院,2014,1:25万大同市幅区域地质调查报告

层进行了详细划分(图3)。1967年河北省区测队在进行1:20万张家口幅区域地质矿产调查时(河北省区域地质测量大队,1967,1:20万张家口幅地质图说明书),将区内太古界变质岩系自下而上分为马市口组、下白窑组、崇礼组和黄土窑组,其中马市口组为一套深变质的暗色麻粒岩组合,包括紫苏斜长麻粒岩、二辉斜长麻粒岩夹少量二辉磁铁石英岩;下白窑组为一套中深变质的含矽线石榴二长浅粒岩、矽线石榴钾长浅粒岩组合,局部含石墨;崇礼组为一套中级变质的角闪斜长片麻岩和斜长角闪岩组合;黄土窑组为一套斜长角闪岩、含石榴黑云斜长片麻岩夹云母片岩、大理岩组合。1969年山西省区测队在进行1:20万大同幅区域地质矿产调查时(山西省区域地质测量大队,1969,1:20万大同幅地质图说明书),将区内变质岩统称为太古界桑干群,并将紫苏斜长麻粒岩、二辉斜长麻粒岩夹少量磁铁石英岩组合划归为葛胡窑组,并以磁铁石英岩为标志层划分为上段和下段;同时将大理岩和含石墨富铝表壳岩系划归为黄土窑组,并根据岩性组合不同分为上、下两段。1970年河北省区测队在进行1:20万天镇幅地质矿产调查时(河北省区域地质测量大队,1970,1:20万天镇幅地质图说明书),将区内变质岩系同样划归为太古界桑干群,但在地层划分上有

所不同,将下部夹少量磁铁石英岩的麻粒岩、片麻岩部分划归为瓦窑口组,并进一步划分为上段和下段;将区内含石墨富铝片麻岩岩系与石榴黑云斜长片麻岩、含紫苏黑云斜长片麻岩互层部分划归为右所堡组,并划分为上、下两段。

随后,山西省地层表编写组于1979年废弃了桑干群,并用集宁群代替,自下而上分为瓦窑口组、右所堡组、大石窑沟组和下白窑组,此时集宁群的涵盖内容及范围均明显扩大。董启贤和周俊昌(1984)将扩大的集宁群一分为二,将下部的麻粒岩命名为下集宁群,原下白窑组和黄土窑组命名为上集宁群,并认为其间可能存在不整合。刘宇光(1989)把冀西北及邻区的原桑干群分为麻粒岩系和孔兹岩系,麻粒岩系又称为怀安杂岩。沈其韩等(1989)把广义的集宁群分为上、下两个岩组,下部岩组为麻粒岩一片麻岩—花岗岩杂岩系,上部岩组为含石墨富铝片麻岩系,并认为上、下岩组间大部分为断层接触。赵宗溥(1993)认为原大同葛胡窑组、天镇瓦窑口组和怀安马市口组为同时代形成的变质杂岩体,其主体麻粒岩的原岩为TTG岩套,将少量出露的变质表壳岩命名为马市口群,其上的孔兹岩系命名为下白窑群,并认为麻粒岩系和孔兹岩系间为角度不整合关系。卢良兆等(1996)将天镇—怀安地区的变质地层

均划归为孔兹岩系,形成时代为太古代,并认为麻粒岩与孔兹岩间呈构造叠置产出.Qian and Li(1999)提出,华北北部麻粒岩相带内的孔兹岩与下覆灰色片麻岩杂岩基底间存在一个区域性新太古代不整合界面,代表华北克拉通演化过程中重要的构造热事件,同时文中将下部中性麻粒岩和灰色片麻岩命名为葛胡窑灰色片麻岩杂岩或葛胡窑杂岩,上部的孔兹岩系命名为丰镇群。

1991—1996 年,山西区调队在进行 1:5 万阳高测区区域地质调查时认为(山西省地质矿产局区调队,1996,1:5 万阳高测区区域地质调查报告),之前的 1:20 万区调中所厘定的瓦窑口组、右所堡组、葛胡窑组和黄土窑组变质地层实为不同时代、不同成因的变质杂岩体,可解体为变质深成岩(主体,TTG 片麻岩和少量变质基性侵入岩)和变质表壳岩,报告中将磁铁石英岩、变质镁铁质岩和变质超镁铁质岩组合的变质表壳岩厘定为阳高岩组(阳高表壳岩),将与孔兹岩系有关的变质表壳岩厘定为右所堡岩组和黄土窑岩组,形成时代为中太古代.在随后出版的《中国地层典(太古宇)》中,沈其韩等(1996)认为,晋冀蒙交界地带的深变质岩可分为两部分:下部以浅色麻粒岩为主,上部以孔兹岩为主.孔兹岩部分采用集宁岩群,形成时代为新太古代;下部麻粒岩系称为桑干杂岩,其主体为变质岩浆岩,而表壳岩以残留层、大型包体产出其中.吴昌华和钟长汀(1997)通过系统总结孔兹岩系的岩石学特征、变质作用以及年代学数据,提出晋蒙高级地体中孔兹岩系的原岩时代应为古元古代,而非太古代.随后,万渝生等(2000)根据地质、地球化学和 Nd 同位素研究认为,华北克拉通及邻区孔兹岩系均形成于古元古代.

近年来在晋冀蒙交界地区开展的区调工作,对区内变质岩系进行了详细解体,划分为不同的构造岩石地层单元.2008 年河北省地质调查院区调所在进行 1:25 万张家口市幅区域地质调查修测时(河北省地质调查院区调所,2008,1:25 万张家口市幅区域地质调查报告),将图幅内大面积变质岩系划归为古太古代桑干岩群,并划分为下部马市口岩组和上部右所堡岩组,同时将区内的变质深成岩划分为新太古代斜长花岗质片麻岩和古元古代变质二长花岗岩类,同时沿乔子烟村—上罗窑村—蔓菁沟村一带勾画出一条太古代混杂岩带.2014 年山西省地质调查院在进行 1:5 万天镇测区地质矿产调查时(山西省地质调查院,2014,1:5 万天镇测区地质报告),将天镇—怀安地区的太古代变质岩系解体为变

质深成岩(主体)和变质表壳岩两部分,其中将表壳岩中含磁铁石英岩和变质基性岩部分划归为阳高岩组,将含石墨富铝片麻岩、变质基性岩及大理岩部分厘定为集宁岩群黄土窑岩组和右所堡岩组,并根据侵入和包裹关系,认为这些变质表壳岩形成时代为新太古代,并早于变质深成岩;此外,在同年完成的 1:25 万大同市幅区调报告中(山西省地质调查院,2014,1:25 万大同市幅区域地质调查报告)将大同一集宁地区孔兹岩系厘定为古元古代集宁岩群,由下至上划分为黄土窑岩组、沙渠村岩组和东沟子岩组.

2 研究区内变质表壳岩野外产状及岩石学特征

近两年来,笔者承担了天镇—怀安地区 1:5 万填图工作,对区内早前寒武纪变质杂岩基底进行了详细调查,并将其解体为不同时代的变质表壳岩和变质深成岩单元,并建立了本区早前寒武纪地质演化格架.其中,变质表壳岩在研究区零星分布,出露规模小,一般呈透镜体、带状体或构造岩片产出于各类新太古代变质 TTG 片麻岩中,出露面积约占变质基底总面积 5%~10%.基于地质调查及岩石学对比研究,本文新识别出二辉麻粒岩—磁铁石英岩组合、榴云片麻岩—变粒岩组合、石榴角闪二辉麻粒岩—大理岩组合以及含石墨矽线石榴钾长片麻岩—变粒岩—大理岩组合 4 套不同成因类型的变质表壳岩单元(图 2).

2.1 二辉麻粒岩—磁铁石英岩组合

该组合在研究区内广泛分布,在天镇县周家山村南、石厂沟,怀安县寺沟—蔓菁沟以及东减昌沟—阎家梁等地出露较好(图 2),是区内小型铁矿主要产出层位.该套岩石野外露头规模较小,一般呈豆荚状或透镜状包体产出与麻粒岩相一角闪岩相 TTG 片麻岩中,单个露头出露宽度在 40~100 m,长度在 100~300 m,局部地区连续性较好,呈带状分布(图 2,图 4a).由于产出磁铁矿,该套岩石在区内被大量开采,在野外采坑中可见该套岩石的岩石组成及产状关系.该套组合的主体岩石为二辉麻粒岩(图 4b、4c),局部见少量斜长角闪岩,伴生 BIF、石榴黑云斜长片麻岩和含磁铁矿石榴石英岩团块.BIF 铁矿层一般厚度在 0.5~2.0 m,延伸长度在 10~50 m,呈薄层状或透镜状断续产出与变质基性岩或麻粒岩相 TTG 片麻岩中(图 4d、4e),铁矿品位介于 10%~

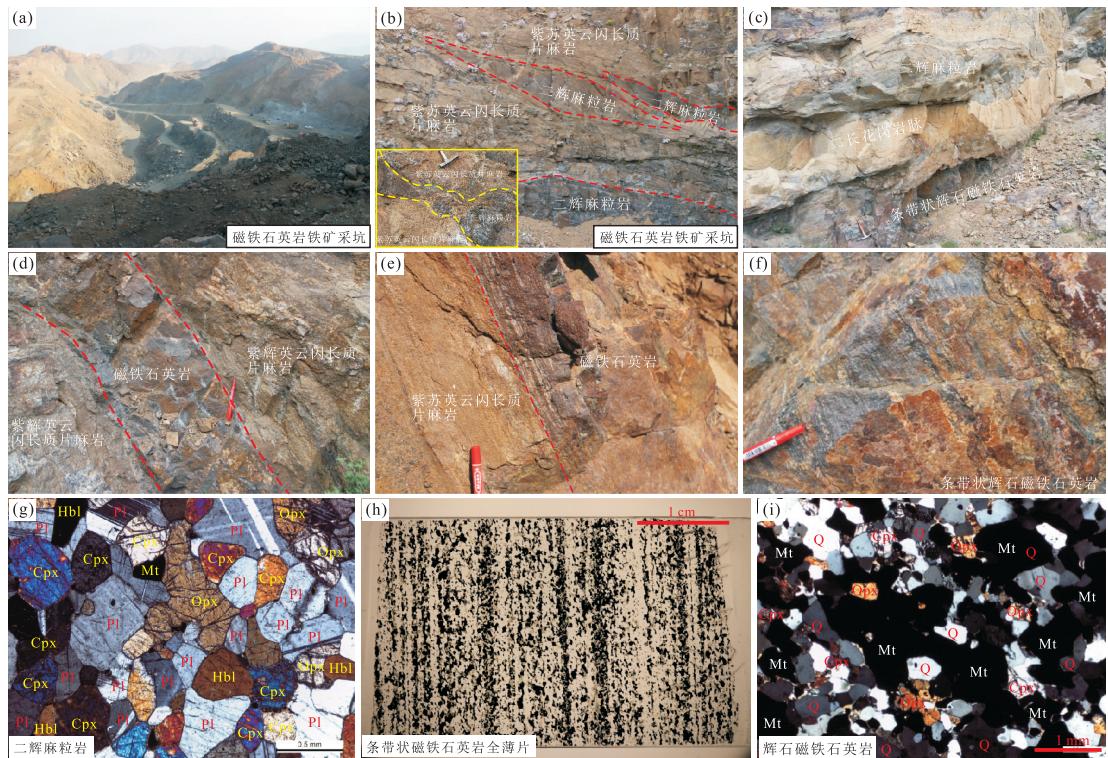


图4 二辉麻粒岩—磁铁石英岩组合野外照片及显微照片

Fig.4 Field photographs of two-pyroxene granulite-magnetite quartzite association and micrographs

a.磁铁矿采坑;b.铁矿采坑中二辉麻粒岩遭受塑性流变改造,在变形过程中被拉断,形成构造透镜体和石香肠构造,拖尾现象明显;c.铁矿采坑露头中见残留的条带状辉石磁铁石英岩,被二长花岗岩脉侵入,且二辉麻粒岩呈塑性变形特征,条带状构造发育;d.BIF呈透镜状包体产出紫苏英云闪长质片麻岩中;e.BIF与紫苏英云闪长质片麻岩接触界线,两者间产状一致;f.条带状辉石磁铁石英岩露头照片,条带状构造发育;g.二辉麻粒岩显微照片;h.条带状角闪辉石磁铁石英岩全薄片照片;i.辉石磁铁石英岩显微照片.Q.石英;Mt.磁铁矿;Hbl.角闪石;Cpx.单斜辉石;Opx.斜方辉石

30%,局部伴生黄铜矿和黄铁矿。区域地质调查表明,该套岩石野外无完整露头,原始的地层结构现已无法识别。

笔者野外观察发现二辉麻粒岩遭受强烈塑性流变作用改造,片麻状和条带状构造发育,其产状与围岩TTG片麻岩一致,由于二辉麻粒岩相对于围岩TTG片麻岩能干性强,在变形过程中被拉断,形成构造透镜体和石香肠构造,且变形拖尾现象明显(图4b、4c)。由于磁铁石英岩大多呈夹层产出在二辉麻粒岩中,两者遭受同样的构造变形过程。二辉麻粒岩的矿物组成为紫苏辉石(15%~20%)+单斜辉石(20%~25%)+斜长石(50%~55%)+角闪石(2%~3%),具有粒状变晶结构特征;磁铁石英岩中暗色矿物含量高,可达5%~10%,主要包括紫苏辉石、单斜辉石和角闪石等;矿物组成表明该套岩石记录了麻粒岩相变质作用。石榴黑云斜长片麻岩为富铝片麻岩类,其主要矿物组成为石英(20%~25%)、斜长石(60%~65%)、石榴石(5%~8%)以及黑云母(~5%)等,岩石条带状构造发育,形成大量长英

质浅色脉体,在与磁铁石英岩接触处,局部形成含磁铁矿石榴石英岩团块。野外观察及岩相学研究表明,该套岩石遭受了麻粒岩相变质及地壳深层次下塑性流变作用改造。

条带状角闪辉石磁铁石英岩(YG-2):粒状变晶结构,条纹状或条带状构造(图4f、4h),主要矿物组合为石英+磁铁矿+紫苏辉石+单斜辉石+角闪石+长石(图4i)。石英为不规则粒状,具有变晶特征,粒径为0.3~0.5 mm,含量60%以上;磁铁矿为不规则粒状,定向较好,粒径在0.1~0.6 mm,与石英构成相间条带,含量在15%~30%;暗色矿物出现紫苏辉石、单斜辉石以及角闪石等,含量约10%,记录了麻粒岩相变质。

2.2 石榴黑云片麻岩—变粒岩组合

该组合是新识别出的一套岩石单元,在以往区调工作中未曾报道。主要分布于研究区北部天镇县黄蒿坪—周家山以及怀安县黑石山—安儿沟—团山村一带,南部地区零星出露(图2)。在野外呈长条状或带状产出,片麻理产状与围岩TTG片麻岩一致,

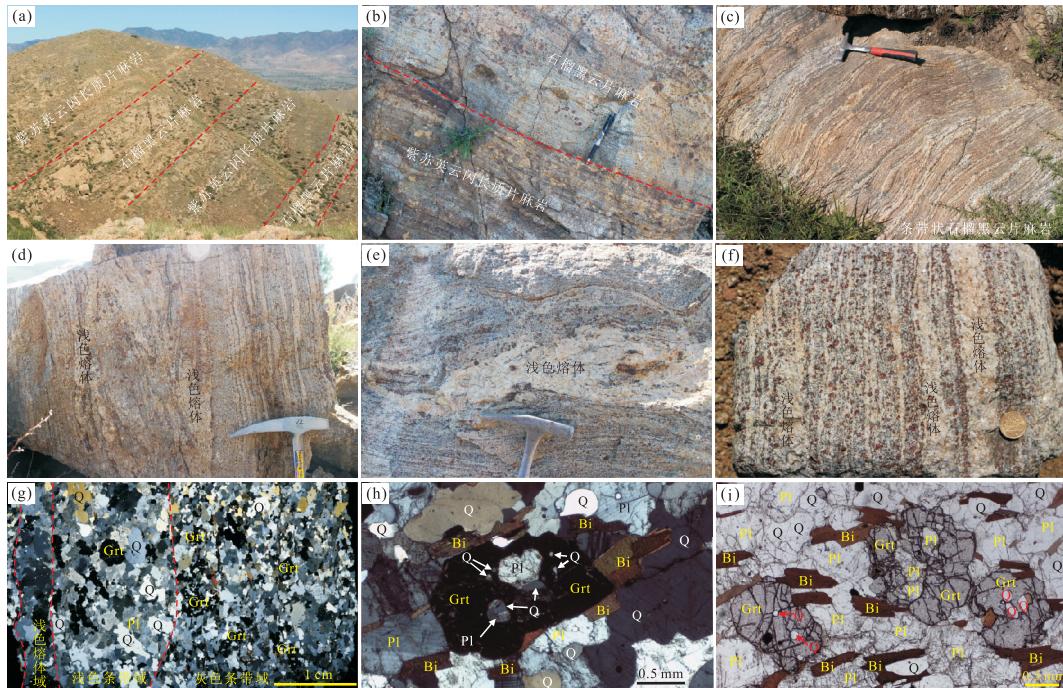


图 5 条带状石榴黑云斜长片麻岩野外露头及显微照片

Fig.5 Field outcrop photographs and micrographs of the banded garnet biotite plagioclase gneiss

a.石榴黑云片麻岩与紫苏英云闪长质片麻岩相间产出;b.石榴黑云片麻岩与紫苏英云闪长质片麻岩接触界线;c.条带状石榴黑云斜长片麻岩野外露头,条带状构造发育;d~f.条带状石榴黑云斜长片麻岩中含浅色熔体脉;g.条带状石榴黑云斜长片麻岩全薄片显微照片,可见不同成分域;h,i.石榴黑云斜长片麻岩显微照片,石榴石中可见石英和斜长石包裹体.Q.石英;Pl.斜长石;Grt.石榴石;Bi.黑云母

野外呈谐和的构造接触关系(图 5a、5b);局部呈透镜状产出于新太古代变质 TTG 片麻岩中,并可见侵入包裏关系。野外调查表明,石榴黑云片麻岩与 TTG 片麻岩围岩接触处一般存在 1~5 m 宽的过渡带,过渡带内石榴石晶形相对粗大,且石榴石含量由石榴黑云片麻岩向 TTG 片麻岩方向逐渐变少,直至 TTG 片麻岩内无石榴石产出(图 5b)。该套岩石的岩石组合相对单一,野外无层序结构,主体岩性为石榴黑云斜长片麻岩(80%以上),伴生石榴斜长变粒岩、浅粒岩等岩石,局部出现少量石榴石英岩或富石榴石团块。岩石中主要的变质暗色矿物为石榴石和黑云母,无石墨和矽线石。石榴黑云斜长片麻岩在野外可观察到典型的条带状构造(图 5c、5f),表现为灰色和浅色条带相间的构造样式,条带宽度一般为 1~3 cm。其中的灰色条带主要由石英、斜长石、石榴石和黑云母组成,暗色矿物石榴石和黑云母含量相对较高(15%~20%);而浅色条带主要由石英、斜长石和少量石榴石组成,矿物粒度大且自形程度高,石榴石含量小于 5%(图 5g)。同时在野外露头上,可见大量的脉状、指状或布丁状长英质浅色体产出于石榴黑云斜长片麻岩之中(图 5d~5f),且浅色体之间多以细脉相互连通,这表明岩石发生了部分熔融(深熔作用),

且部分熔体发生了运移。该套岩石野外出露宽度一般为 30~100 m,长 0.5~1.0 km,最长延伸约 2~3 km。

条带状石榴黑云斜长片麻岩(16YG-4、HSS-2):鳞片粒状变晶结构,条带状或片麻状构造。在全薄片显微照片中可观察到灰色条带域、浅色条带域和浅色熔体域(图 5g),且在 3 个成分域之间存在长英质矿物粒度逐渐增大、自形程度逐渐增高,而暗色矿物黑云母和石榴石含量逐渐减少等变化特征。主要矿物组成为石英+斜长石+石榴石+黑云母±条纹长石。石榴石为变斑晶,含石英、斜长石等包裹体;石英和斜长石具有变晶特征,其晶体边界不规则,呈现港湾结构(图 5h)。

2.3 石榴角闪二辉麻粒岩一大理岩组合

主要分布在天镇县西赵家窑和罗家沟一带,呈大型构造岩片产出于变质 TTG 片麻岩之中。该组合的主体岩石为石榴角闪二辉麻粒岩或二辉斜长角闪岩,含透辉/蛇纹石大理岩和钙镁硅酸盐岩(图 6),此外局部见少量矽线石榴黑云钾长片麻岩。在天镇县罗家沟一带,该套岩石空间上呈东西向展布,横向岩层组合稳定,总体呈大型的向形构造,北部向南南西倾斜,南部向北北东倾斜,向形内部的大理岩组合不仅发育同斜紧闭褶皱,而且发育一系列宽缓的

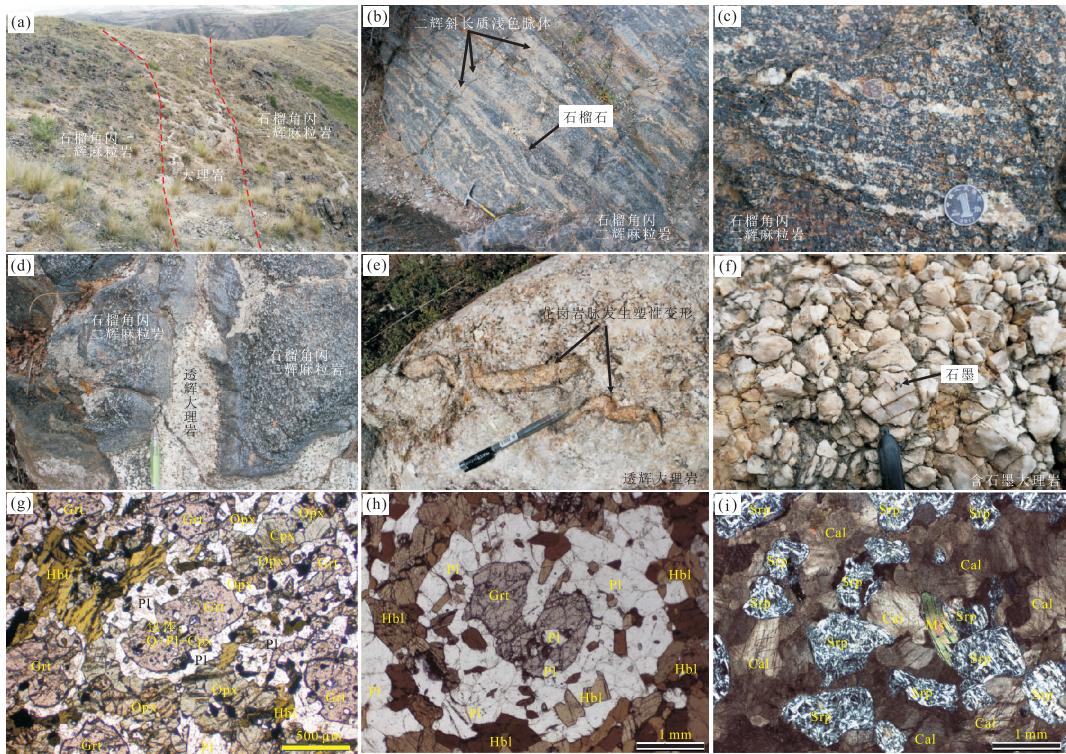


图 6 石榴斜长角闪岩一大理岩组合野外露头及显微照片

Fig.6 Field outcrops photographys and micrographs of the granet plagioclase amphibolites-marble association

a.石榴角闪二辉麻粒岩中夹带状大理岩;b.含石榴角闪二辉麻粒岩中可见辉长质浅色脉体;c.石榴角闪二辉麻粒岩中石榴石白眼圈结构;d.石榴角闪二辉麻粒岩中大理岩透镜体,并可见接触反应边;e.侵入大理岩的花岗岩脉发生塑性变形;f.大理岩含晶质石墨;g.石榴角闪二辉麻粒岩显微照片,石榴石中包裹体为Q+Pl+Cpx,边缘白眼圈为Pl+Cpx+Opx,基质为Hbl+Pl;h.石榴角闪二辉麻粒岩显微照片,石榴石中包裹体组合为Pl+Cpx,边缘白眼圈为Pl+Hbl±Cpx组合,基质为Pl+Hbl组合;i.蛇纹石大理岩.Q.石英;Pl.斜长石;Grt.石榴石;Opx.斜长辉石;Cpx.单斜辉石;Hbl.角闪石;Srp.蛇纹石;Cal.方解石;Ms.白云母

大型褶皱,在西赵家窑村一带,该套岩石空间形态上呈弧形,沿北西—南东向展布,发育系列紧闭褶皱,在石榴角闪二辉麻粒岩中可见多条大理岩出露。

该套岩石中的石榴角闪二辉麻粒岩是本次工作新识别出的高压基性麻粒岩类型,在野外可见典型的“白眼圈”结构(图 6g、6h),核部为暗红色石榴石集合体,含石英+斜长石+单斜辉石等矿物包裹体;石榴石边缘环绕由辉石+斜长石或斜长石+角闪石组成的“白眼圈”结构。此外,在局部可见“双眼圈”结构,表现为“白眼圈”之外存在富角闪石的“黑眼圈”结构(图 6h)。这些结构表明石榴角闪二辉麻粒岩经历了高压麻粒岩相—麻粒岩相—角闪岩相连续的退变反应过程。野外观察表明,石榴角闪二辉麻粒岩遭受强烈的塑性变形和部分熔融作用(深熔作用),片麻状和条带状构造发育,形成斜长花岗质和辉长质浅色体(熔体),呈脉状、网状、指状或透镜状等样式产出(图 6b、6c),其中斜长花岗质浅色体主要由斜长石和石英组成,辉长质浅色脉体由紫苏辉石、单斜

辉石和斜长石组成。由于石榴角闪二辉麻粒岩相对于浅色脉体能干性强,在塑性流变变形过程中出现石香肠构造(图 6b)。

大理岩是该套岩石中特殊的岩石类型,在野外呈条带状或透镜状产出于石榴角闪二辉麻粒岩中,一般宽度为 2~3 m,延伸 300~500 m,最大可达 1.5 km。主要岩性为透辉大理岩和蛇纹石化橄榄大理岩,含晶质石墨和花岗岩岩屑(图 6e、6f)。钙镁硅酸盐岩局部与大理岩伴生,主要矿物组成为透辉石(60%~65%)和方解石(30%~35%),并可见少量石墨。大理岩主要由粗晶方解石组成,自形程度较好,可见 3 组解理,一般大小为 0.5~1.0 cm,部分可达 1.5 cm,含量在 80%~90% 不等;暗色矿物有透辉石和蛇纹石化橄榄石等,含量为 15%~20%,部分可达 30%。大理岩中花岗岩脉发生塑性变形(图 6e),在变形中被拉断,形成构造透镜体,并可见拖尾现象,而大理岩中方解石晶形较好,为粗晶结构,这表明方解石是变形后重结晶的产物(图 6e、6f)。此

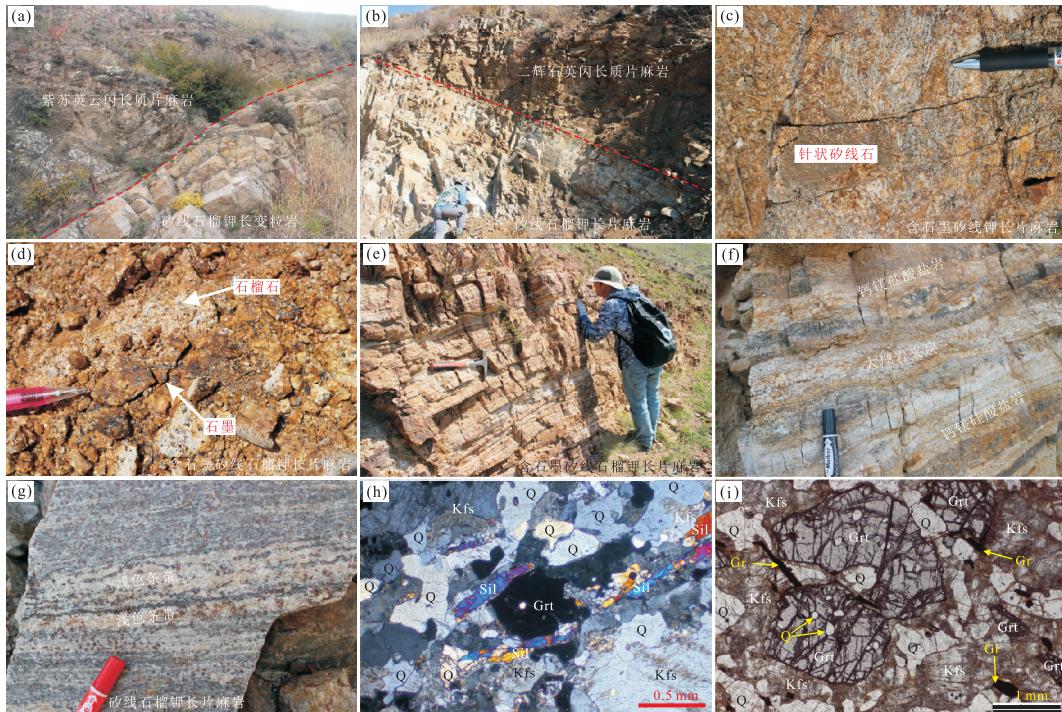


图 7 含石墨矽线石榴钾长片麻岩—变粒岩一大理岩组合野外露头及显微照片

Fig.7 Field outcrops photographys and micrographs of the graphite-sillimanite-granet K-feldspar gneiss-marble association
a.紫苏英云闪长质片麻岩与矽线石榴钾长变粒岩界线(史家庄);b.二辉石英闪长质片麻岩与矽线石榴钾长片麻岩界线(蔓菁沟);c.含石墨矽线石榴钾长片麻岩中的片麻理面可见大量针状矽线石(罗家山);d.含石墨矽线石榴钾长片麻岩可见晶质石墨,岩石风化后呈黄褐色(史家庄);e.含石墨矽线石榴钾长片麻岩呈“似层状”产出(罗家山);f.钙镁硅酸盐岩露头,夹透辉粗晶大理岩(史家庄);g.矽线石榴钾长片麻岩(蔓菁沟);h.矽线石榴钾长片麻岩显微照片;i.含石墨石榴斜长变粒岩显微照片. Q.石英;Pl.斜长石;Sil.矽线石;Grt.石榴石;C.石墨;Kfs.钾长石

外,蛇纹石化橄榄大理岩与石榴角闪二辉麻粒岩间接触处存在宽度为 5 cm 的反应边,可能在变质—变形过程中发生了物质交换(图 6d)。

石榴角闪二辉麻粒岩(LJG-2):似斑状粒状变晶结构,片麻状或条带状构造;主要由石榴石(10%~15%)、紫苏辉石(10%~15%)、单斜辉石(5%~10%)、角闪石(25%~30%)和斜长石(35%~40%)等组成;石榴石多呈变斑晶,一般大小为 0.3~1.0 cm,最大可达 2 cm,可见石英、辉石、斜长石、角闪石等包裹体,边缘发育辉石+斜长石或斜长石+角闪石组合,而岩石基质主要由中粗粒角闪石和斜长石组成,大小为 0.5~1.0 mm(图 6g、6h)。

2.4 含石墨矽线石榴钾长片麻岩—变粒岩一大理岩组合

主要分布在研究区北部罗家山—朱家沟—史家庄以及东部怀安城席麻沟—蔓菁沟一带,南部冷家沟—东减昌沟一带少量出露(图 2)。野外宏观上近东西向展布,连续性较好,呈大型带状岩片产出于变质深成岩体之中,两者间岩性界线截然(图 7a、7b)。该套岩石以出现石墨、矽线石和石榴石这一特殊变质

矿物组合为特征(图 7c、7d),主体为一套钾长片麻岩和变粒岩组合,部分露头可见大理岩、钙镁硅酸盐岩以及石榴石英岩夹层(图 7f),主要岩性有含石墨矽线石榴钾长片麻岩、含石墨石榴钾长变粒岩、石榴浅粒岩、石榴石英岩、透闪/金云母大理岩等,是区内石墨矿主要产出层位。

该套岩石在罗家山—朱家沟一带主要出露有石墨矽线石榴钾长片麻岩、矽线石榴钾长变粒岩等,无大理岩;在史家庄一带出露有石墨矽线石榴黑云钾长片麻岩、矽线石榴钾长变粒岩、石榴石英岩以及透辉大理岩等,有石墨矿点;在怀安城席麻沟—蔓菁沟一带,该套岩石与变质 TTG 片麻岩相间产出,主要岩性有石榴黑云钾长片麻岩、矽线石榴钾长变粒岩以及含石墨矽线石榴钾长片麻岩等,无大理岩,有石墨矿点;在冷家沟—东减昌沟一带主要出露矽线石榴黑云钾长片麻岩、金云母大理岩和长石石英岩等,无石墨矿点。野外观察表明,该套岩石遭受了强烈的构造置换作用,野外露头呈现“似层状”构造(图 7b、7e),整体为一套“有层无序”的构造岩石组合,原始地层层序无法识别。通过区域对比研究,该套岩石的

岩石组合及矿物组成具有孔兹岩的典型特征。

含石墨矽线石榴黑云钾长片麻岩样品(16SJZ-1)采自史家庄西200 m处。岩石为鳞片粒状变晶结构,片麻状构造;主要矿物组成为石英、条纹长石、矽线石、石榴石和黑云母,含少量斜长石和石墨。矽线石呈针状集合体产出,主要沿片麻理面生长,局部定向较好,含量约为5%;石榴石呈粉红色,多为变斑晶,含石英、斜长石等包裹体,大小一般为3~5 mm不等,含量约为10%;石墨为鳞片状,大小为1~3 mm,分布不均,含量较少;条纹长石和石英晶形不规则,自形程度较差,具有溶蚀和港湾结构;黑云母为鳞片状,定向较好。

含石墨石榴钾长变粒岩样品(16ZJG-3)采自朱家沟南1 km处。岩石为粒状变晶结构,片麻状构造;主要由石英、条纹长石、石榴石组成;石榴石为粒状变晶结构,可见石英、长石等包裹体,大小为3~5 mm,含量为10%~15%;石英和条纹长石晶形不规则,自形程度较差,具有溶蚀和港湾结构,石英含量约15%。

3 锆石U-Pb年代学

3.1 分析方法

本文样品粉碎及锆石分选均在河北省廊坊市宇能岩矿公司完成。锆石分选首先用常规方法进行粉碎,并用浮选和电磁选方法进行分选,最后在双目镜下选出锆石。锆石制靶、阴极发光(CL)以及透、反射照相均在北京锆年领航有限公司完成。在观察锆石CL图像基础上,结合反射光和透射光照片,避开锆石中的裂隙、包裹体和杂质,选择锆石测年点位。锆石U-Pb定年测试分析在天津地质调查中心同位素实验室完成。分析所用的LA-ICP-MS由New Wave的193 nm激光剥蚀系统和Thermo Fisher的Neptune多接收等离子体质谱仪组成。测试方法见李怀坤等(2010)。分析时采用GJ-1作为外部标准校正锆石中U、Th和Pb同位素分馏;同时采用NIST610玻璃作为标样计算锆石中U、Th、Pb含量;采用²⁰⁸Pb校正法进行普通铅校正(Andersen, 2002)。最后利用ICPMsDataCal程序(Liu *et al.*, 2010)和Isoplot3.0程序(Ludwig, 2003)进行数据处理。

3.2 锆石U-Pb测年结果

为准确获得各类变质表壳岩的形成年龄,本文选取了条带状角闪辉石磁铁石英岩(YG-2)、条带状石榴黑云斜长片麻岩(16YG-4、HSS-2)、含石墨矽

线石榴黑云钾长片麻岩(16SJZ-1)、含石墨石榴钾长变粒岩(16ZJG-3)以及石榴角闪二辉麻粒岩(LJG-2)共6个代表性样品进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb定年。锆石的U-Pb测试分析数据列于附表1。

3.2.1 条带状角闪辉石磁铁石英岩(16YG-2) 锆石CL图像显示,样品中大部分锆石呈椭球状或短柱状,颗粒一般大小为80~150 μm,少数锆石呈板柱状,长轴为100~150 μm,该类锆石自形程度高,可见宽缓条带,具有中一基性岩浆锆石特征。大部分锆石可见核一边结构,核部锆石多呈灰黑色,可见振荡环带或条带结构,边部为灰色或灰白色,为变质边锆石(图8)。变质边一般较窄,少数达30~50 μm,可进行同位素测试。

本次对该样品66颗锆石进行了66个年龄点测定。U含量介于 149×10^{-6} ~ 4327×10^{-6} ,平均值为 705×10^{-6} ;Th/U介于0.02~1.10。在图9中,所有数据点均位于谐和线上及附近,并可明显分出两组:年龄老的一组锆石表面年龄主要介于2 300~2 500 Ma,少数位于~2 200 Ma附近,所有年龄数据点沿谐和线呈串珠状分布,其中年龄较大的4个数据点加权平均²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄为2 489±19 Ma(MSWD=0.08);年龄小的一组数据相对集中,26个数据点加权平均²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄为1 807±8 Ma(MSWD=0.96),这一组年龄与区域变质事件相吻合,代表变质作用时代。此外,对比CL图像,记录约2 489 Ma年龄的锆石大多为较自形的板状锆石,结合阿尔戈马型磁铁石英岩的成岩过程,笔者认为该类锆石可能来源于同沉积的火山灰物质,获得的年龄代表岩石的形成年龄。

3.2.2 条带状石榴黑云斜长片麻岩(16YG-4、HSS-2) 样品16YG-4和HSS-2中锆石整体形态类似,呈椭球状、浑圆状,且锆石颗粒大小较均一,直径介于100~150 μm(图8)。从阴极发光图像上可以看出,大部分锆石具有核一边结构,核部锆石为灰白色或灰黑色,可见明显的振荡环带,具有岩浆锆石特点,且形态上多呈浑圆状,推测为碎屑锆石;边部为灰色或灰白色,是围绕核部锆石生长的变质边,大部分锆石变质边较窄,少数达30~50 μm,可进行同位素测试。

本次对样品16YG-4中51颗锆石进行了51个年龄点测定。U含量介于 66×10^{-6} ~ 1622×10^{-6} ,平均值为 529×10^{-6} 。根据Th/U比值大小,可划分两组:第一组Th/U介于0.27~1.07,根据CL图像对比,测试点主要位于锆石核部,获得的锆石表面年

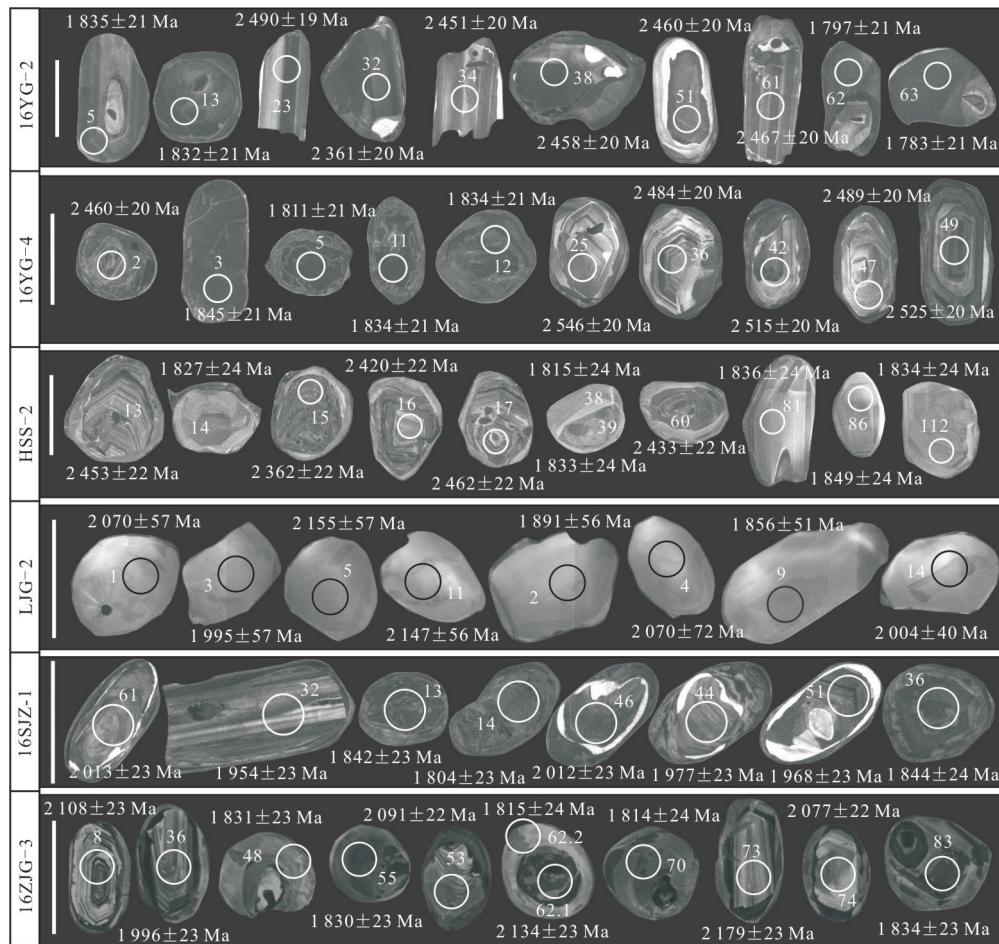


图 8 天镇地区变质表壳岩样品锆石阴极发光图像

Fig.8 Cathodoluminescence images of zircons from meta-supracrustal rocks in the Tianzhen area

YG-2.条带状角闪辉石磁铁石英岩;16YG-4、HSS-2.条带状石榴黑云斜长片麻岩;16SJZ-1.含石墨矽线石榴黑云钾长片麻岩;16ZJG-3.含石墨石榴钾长变粒岩;LJG-2.石榴角闪二辉麻粒岩.比例尺为 100 μm

龄主要集中在 2 400~2 529 Ma, 少量数据位于 2 300 Ma 附近, 所有数据点沿着谐和线呈串珠状分布(图 9), 其中年龄较大的 9 个数据点加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2 522 ± 13 Ma(MSWD=0.38); 另一组 Th/U 介于 0.01~0.08, 根据 CL 图像对比, 测试点主要位于锆石边部, 获得的表面年龄为 1 800~1 946 Ma, 在锆石 U-Pb 谐和图中数据相对集中(图 9), 其中 14 个数据点加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 1 838 ± 14 Ma(MSWD=1.2), 此组年龄与区域变质事件相吻合, 应代表变质作用年龄。

对样品 HSS-2 中 108 颗锆石进行了 112 个年龄点测定。U 含量介于 50×10^{-6} ~ $1 864 \times 10^{-6}$, 平均值为 296×10^{-6} ; Th/U 比值介于 0.01~2.31. 在锆石 U-Pb 谐和图上可见, 所有数据可明显划分为两组, 前一组锆石数据可拟合一条不一致线, 上交点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 2 459 ± 14 Ma(MSWD=2.3), 误差较大, 其中位于谐和线上或附近的年龄较

大的 7 个数据点加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2 471 ± 16 Ma(MSWD=0.16); 另一组数据点位于谐和线上, 且非常集中, 26 个数据点加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 1 831 ± 9 Ma(MSWD=0.64), 这与区域变质事件年龄一致, 代表变质作用年龄。

3.2.3 石榴角闪二辉麻粒岩(LJG-2)

样品中锆石呈浑圆状、椭球状, 粒径介于 60~110 μm . CL 图像显示(图 8), 锆石均为灰白色或灰色, 所有锆石无振荡生长环带, 部分锆石具有弱扇状结构, 整体具有变质锆石特征。从附表 1 中可以看出, 绝大部分锆石 U 含量小于 20×10^{-6} , 由于较低的 U 含量, 获得的年龄数据误差较大。

对样品 LJG-2 中 15 颗锆石进行了 15 个年龄点测定。在锆石 U-Pb 谐和图上数据点相对集中, 但年齡数据误差大, 锆石表面年龄介于 1 856~2 338 Ma, 其中相对集中的 8 个数据加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2 026 ± 39 Ma(MSWD=0.33);

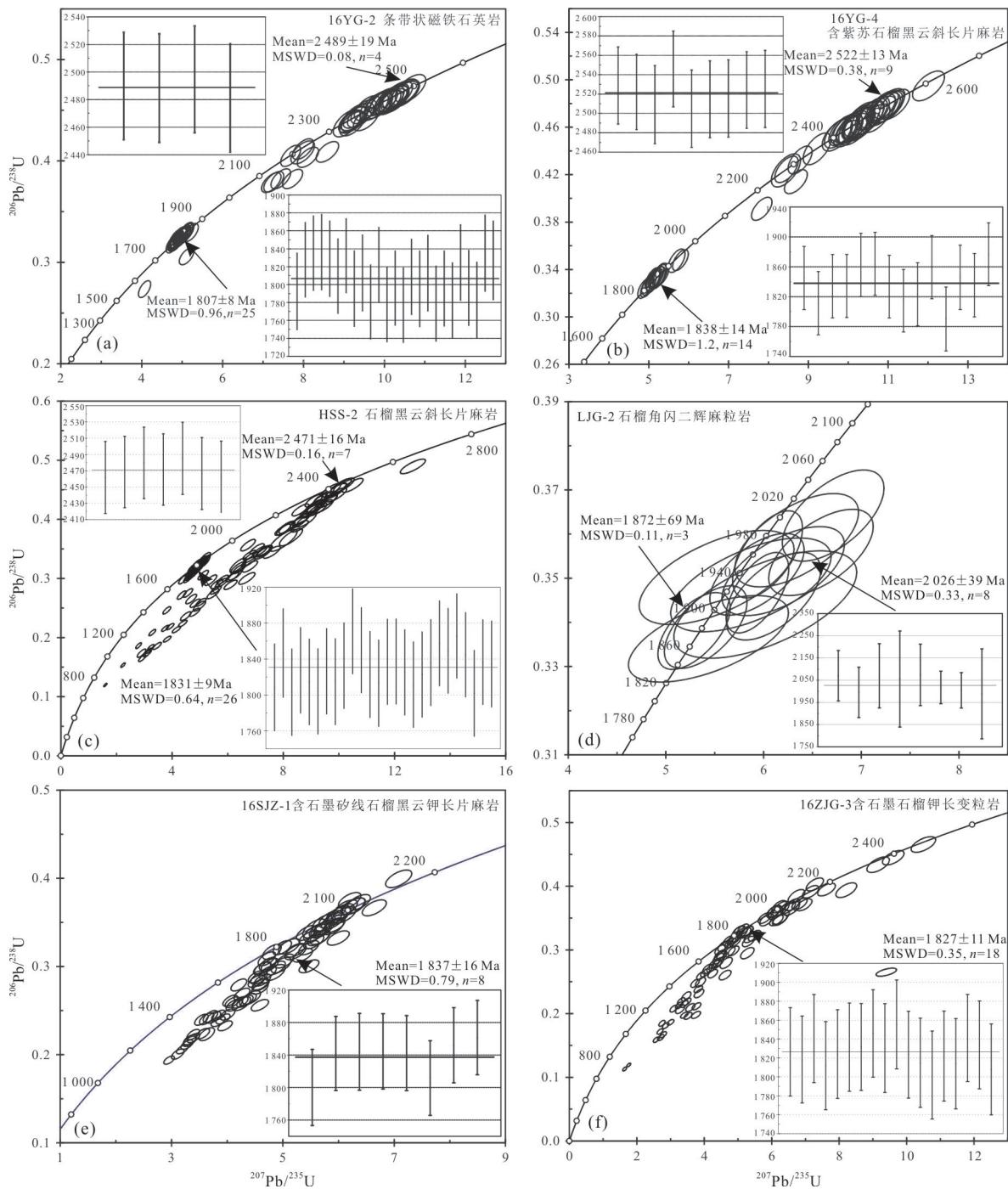


图9 天镇—怀安地区变质表壳岩岩石的锆石U-Pb年龄谐和图

Fig.9 Concordia diagrams of U-Pb ages of zircons from meta-supracrustal rocks in the Tianshen-Huai'an area
用于加权平均计算的年龄数据不一致率介于 $-10\% \sim 10\%$

另外3个数据加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 1872 ± 69 Ma(MSWD=0.11),这与区域变质事件一致,应代表变质年龄.由于岩石具有复杂的变质演化过程,在高压麻粒岩相—麻粒岩相变质过程中锆石U-Th-Pb同位素体系可能发生重置,笔者认为获得的 ~ 2.03 Ga年龄不代表岩石的形成年龄,石榴角闪二辉麻粒岩的原岩形成年龄应大于 2.03 Ga.

3.2.4 含石墨矽线石榴黑云钾长片麻岩(16SJZ-1)和含石墨石榴钾长变粒岩(16ZJG-3) 两个样品中锆石形态相似,以浑圆状、椭球状为主,少量为长柱状,锆石具明显的磨圆现象,粒径介于 $80 \sim 120 \mu\text{m}$.阴极发光图像显示,大部分锆石具有核一边结构,核部锆石形态上呈浑圆状或长柱状,呈灰白色或灰黑色,大部分可见明显的振荡环带或条带结构,具有岩

浆锆石特点;边部为灰色或灰白色,是围绕核部锆石生长的变质边,大部分锆石变质边较窄,少数达30~40 μm (图8),可进行同位素测试。

对样品16SJZ-1中83颗锆石进行了83个年龄点测定.U含量介于 $101 \times 10^{-6} \sim 2940 \times 10^{-6}$,平均值为 554×10^{-6} ;Th/U介于0.03~0.90.在锆石U-Pb谐和图上可见(图9),部分锆石沿谐和线呈串珠状,并发生强烈铅丢失,锆石表面年龄介于1789~2127 Ma,无新太古代年龄信息.从附表1中可见看出,Th/U<0.1的锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄介于1789~2110 Ma($n=12$),其中位于谐和线上和附近的8个数据点年龄介于1800~1862 Ma,可获得加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为1837±16 Ma(MSWD=0.79),与区域变质事件相吻合,应代表变质作用时代.其余锆石年龄应为碎屑锆石年龄,部分锆石可能记录核一边混合年龄.

对样品16ZJG-3中85颗锆石进行了86个年龄点测定.U含量介于 $66 \times 10^{-6} \sim 1844 \times 10^{-6}$,平均值为 555×10^{-6} ;Th/U介于0.02~2.26.根据锆石U-Pb谐和图上数据点分布特征,可以划分为两组:第一组锆石沿谐和线呈串珠状,大部分锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄介于1900~2200 Ma,其中4粒锆石表面年龄大于2300 Ma,均代表碎屑锆石年龄,部分年龄可能记录了核一边混合年龄;另一组数据少量位于谐和线上,大部分发生铅丢失,其中位于谐和线上或附近的17个数据加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为1827±11 Ma(MSWD=0.35),此年龄与区域变质事件相吻合,应代表变质作用时代.

4 讨论

4.1 变质表壳岩的岩石学识别标志及原岩性质

新识别出的4套变质表壳岩具有典型的岩石学识别标志,相互间可以从野外产状、矿物组成、岩石组合以及结构构造等多方面加以区分.BIF作为二辉麻粒岩—磁铁石英岩组合中最具代表性的一类岩石,是识别该组合的主要岩石学标志,同时也是判断其表壳岩属性的主要依据.该套岩石在本区及邻区均有出露,野外呈透镜体状产出,具有分布范围广、单个露头规模小、连续性差等特征,野外无典型的剖面露头.该组合是区内小型铁矿主要开采层位,野外采坑中常见残存的磁铁石英岩透镜体或碎石.根据岩石组合判定,该套岩石原岩为一套基性火山岩—BIF建造,含少量陆

缘碎屑岩,具有阿尔戈马型BIF特征.

石榴黑云片麻岩—变粒岩组合在野外产状、岩石组合以及变质矿物组成等方面均与孔兹岩具有明显区别,且区内未见两者间直接接触关系,两套岩石应为不同性质的变质表壳岩类.该套岩石野外呈带状或透镜状产出,变质TTG片麻岩之中,主体岩石类型为条带状石榴黑云斜长片麻岩,伴生少量石榴斜长变粒岩和石榴浅粒岩等,无大理岩类产出,岩石组合相对简单.主要的暗色变质矿物为石榴石和黑云母,无石墨和矽线石.岩石发生了强烈的深熔作用,形成大量的浅色脉体以及条带状构造.由于石榴黑云片麻岩的矿物组成为石英+斜长石+石榴石+黑云母,钾长石含量较少,其物源区具有富钠贫钾的地球化学特征.根据岩石组合判定,该套岩石的原岩可能为一套杂砂岩建造,且物源较单一.

石榴角闪二辉麻粒岩—大理岩组合以其特殊的岩石组合与其他表壳岩类相区别.该套岩石主体为石榴角闪二辉麻粒岩和大理岩,伴生少量钙镁硅酸盐岩和矽线石榴黑云钾长片麻岩,且大理岩中可见晶质石墨和岩屑.石榴角闪二辉麻粒岩是本次工作新识别出的一类高压基性麻粒岩,其野外产状、岩石组合与前人在恒山(王仁民等,1991; Zhao et al., 2001)、怀安蔓菁沟以及宣化西望山(郭敬辉等,1993,1996)等地发现的原岩为基性岩墙的高压基性麻粒岩明显不同.根据岩石组合判定,该套岩石的原岩为一套基性火山岩夹大理岩建造,局部含少量泥砂质碎屑岩.

含石墨矽线石榴钾长片麻岩—变粒岩—大理岩组合是区内特殊的岩石单元,该套岩石横向连续性较好,呈大型带状构造岩片产出,为一套“有层无序”的变泥砂质岩组合,并以出现石墨、矽线石和石榴石这一特殊变质矿物组合为识别标志,在岩石组合上具有孔兹岩特征,应属于集宁岩群孔兹岩的东延部分.岩石组合及地球化学分析表明,华北克拉通孔兹岩可能为形成于克拉通内部盆地(Condie et al., 1992; 翟明国和彭澎,2007)或被动大陆边缘(卢良兆等,1996; Li et al., 2000)的矽—泥质陆源碎屑岩建造.最近Wu et al.(2016)在怀安蔓菁沟一带变泥质岩石中发现了蓝晶石,变质作用分析揭示该套高压变泥质岩石经历了近等温减压的顺时针P-T轨迹,峰期和峰后退变阶段的P-T条件分别为810~860 °C、1.15~1.50 GPa以及~850 °C和~0.95 GPa,这与区内呈岩墙状产出的高压基性麻粒岩的变质演化过程一致(Guo et al., 2002; Zhang

et al., 2016),表明该区经历了古元古代碰撞造山以及后期伸展的构造演化过程。

4.2 变质表壳岩原岩形成时代

在高级变质岩区,尤其是叠加了后期麻粒岩相变质作用的岩石中的锆石可能会在“干”的岩石体系中发生 U-Th-Pb 同位素体系重置,并具有较高的 Th/U 比值(>0.1) (*Wan et al.*, 2011),同时由于激光剥蚀(探针)电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)在进行锆石 U-Th-Pb 同位素测试中束斑大、剥蚀深,定年结果往往获得介于原岩年龄和变质年龄之间无地质意义的混合年龄(*Kröner et al.*, 2014),这些年龄数据在锆石 U-Pb 谱和图上表现为沿谐和线呈串珠状分布。因此,在处理高级变质岩石的锆石 U-Pb 年龄数据时,需结合锆石 CL 图像以及区域地质演化时序进行合理解释。

研究区内已发表年龄数据的变质表壳岩主要集中在变泥质岩石(孔兹岩),而区内其他变质表壳岩类无年龄数据报道(图 3)。在以往的区调报告中,基于岩石组合对比和变质作用研究将区内含 BIF 变质表壳岩形成时代确定为古太古代(河北省地质调查院区调所,2008,1:25 万张家口市幅区域地质调查报告)或新太古代(山西省地质调查院,2014,1:5 万天镇测区地质报告,1:25 万大同市幅区域地质调查报告),但无可靠年龄数据约束。已有大量年代学研究表明,华北克拉通恒山—五台、冀东、辽东以及阴山等多个太古宙基底中的 BIF 铁矿床形成时代均为新太古代,峰期年龄为 2.52~2.56 Ga(张连昌等,2012;刘利等,2012;*Ma et al.*, 2014;*Han et al.*, 2014,2017;*Wang et al.*, 2014b;耿元生和陆松年,2014;史志强和石玉若,2016;万渝生等,2018),且北京、冀东、辽宁等地 BIF 铁矿记录了新太古代末期—古元古代早期变质事件(2 448~2 511 Ma)(史志强和石玉若,2016 及其参考文献)。本文在 BIF 样品中获得的核部锆石表面年龄主要介于 2 300~2 500 Ma,且所有数据点沿谐和线呈串珠状分布(图 7),在锆石 U-Pb 年龄直方图上表现为多个波峰(图 10)。值得注意的是,华北克拉通在 2.50(2.45)~2.35(2.30)Ga 间表现为“构造寂静期”(*Zhai*, 2011),这一时期内基本无构造—岩浆活动记录。如果获得的年龄均代表碎屑锆石年龄,则 BIF 铁矿床的形成年龄小于 2 300 Ma,这与区域地质演化及 BIF 呈透镜状包体产出在新太古代变质 TTG 片麻岩中的产状关系不符。本文定年结果表明 BIF 经历了 ~1 807 Ma 区域性麻粒岩相变质作用强烈改造,因

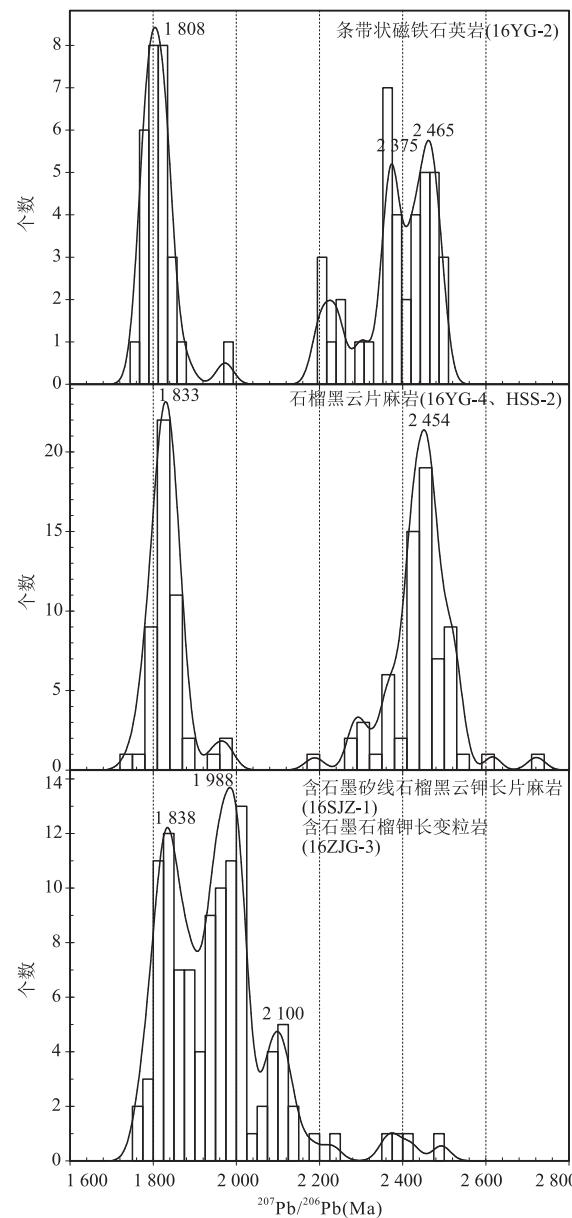


图 10 天镇—怀安地区变质表壳岩锆石 U-Pb 年龄直方图

Fig.10 Histograms of U-Pb ages of zircons from metapsupracrustal rocks in the Tianzhen-Huai'an area

此本文获得的大部分沿谐和线呈串珠状分布的年龄数据可能代表混合年龄或者受变质作用发生强烈铅丢失的结果,无地质意义。此外,年龄较大的 4 个数据点获得的加权平均年龄为 $2\,489 \pm 19$ Ma,对比 CL 图像,这些锆石大多为较自形的板状锆石,具有中—基性岩浆锆石特征,笔者认为该类锆石可能来源于与磁铁石英岩同沉积的火山(灰)物质,获得的年龄代表岩石的形成年龄。因此,本区 BIF 变质表壳岩形成时代应为新太古代末期。

石榴黑云片麻岩—变粒岩组合是本次工作新厘定的岩石单元,前人未进行年代学研究。本文对两个

条带状石榴黑云斜长片麻岩样品进行了锆石 U-Pb 定年, 均获得两组年龄, 在锆石 U-Pb 年龄直方图上表现为 ~ 2.45 Ga 和 ~ 1.83 Ga 两个主峰(图 10). 其中, 两个样品的变质年龄相近, 为 ~ 1831 Ma 和 ~ 1838 Ma, 这与区域变质时限一致, 代表区域性主期麻粒岩相变质事件. 在样品 YG-4 中, 年龄较大的数据均沿谐和线呈串珠状分布, 这与 BIF 样品中年龄数据分布特征一致, 其中的大部分数据可能代表混合锆石年龄, 获得的加权平均年龄 ~ 2522 Ma 可能代表该组锆石的年龄, 这一解释得到样品 HSS-2 年龄数据的支持. 在样品 HSS-2 中获得的年龄数据相对一致, 沿不一致线发生强烈铅丢失, 获得的加权平均年龄为 ~ 2471 Ma. 通过野外地质调查发现, 区内部分地区的石榴黑云片麻岩呈透镜状包体产出在新太古代变质 TTG 片麻岩中, 这表明石榴黑云片麻岩形成时代可能早于 TTG 片麻岩. 结合区域地质演化特征, 笔者认为石榴黑云片麻岩的成岩物质可能来源于新太古代 TTG 岩石(~ 2.5 Ga)的风化沉积物, 但在地表滞留时间较短, 被晚期 TTG 岩浆岩侵入包裹, 岩石中 ~ 2.47 Ga 锆石年龄可能代表新太古代末期—早元古代早期变质事件的记录. 本文将石榴黑云片麻岩的形成时代暂定为新太古代末期.

石榴角闪二辉麻粒岩样品(LJG-2)中锆石 U 含量普遍较低, 获得的年龄误差较大. 岩石学研究表明, 石榴角闪二辉麻粒岩具有复杂的变质演化过程, 记录了高压麻粒岩相—麻粒岩相—角闪岩相连续的退变质作用过程. 本文获得的变质年龄 1872 ± 69 Ma 与区域性古元古代峰期高压麻粒岩相—麻粒岩相退变质时限($1.95 \sim 1.85$ Ga)在误差范围内一致, 代表高压麻粒岩相到麻粒岩相退变质年龄. 另外, 大部分较集中的数据点加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2026 ± 39 Ma, 结合这些具有变质锆石的晶型特征, 且年龄的相对误差较大, 原岩锆石在后期复杂的变质过程中可能发生了 U-Th-Pb 同位素体系的部分重置. 因此, 笔者认为石榴角闪二辉麻粒岩的原岩形成年龄应大于 ~ 2.03 Ga.

本文对属于孔兹岩系的两个样品(16SJZ-1 和 16ZJG-3)进行了锆石 U-Pb 定年, 获得碎屑锆石核部年龄为 $1.99 \sim 2.30$ Ga, 变质年龄为 ~ 1827 Ma 和 ~ 1837 Ma, 个别锆石记录了古元古代早期年龄信息, 在锆石 U-Pb 年龄直方图上表现为 ~ 1.99 Ga 和 ~ 1.84 Ga 两个主峰和 ~ 2.15 Ga 一个次峰(图 10). 前人对研究区东部蔓菁沟一带孔兹岩样品进行了详细的锆石 U-Pb 年代学研究, 获得 ~ 1.85 Ga 和

~ 1.95 Ga 两阶段变质年龄, 以及个别年龄为 $2683 \sim 1964$ Ma 的碎屑锆石(Wang *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2010). 最近, 蔡佳等(2017)对采自天镇县薛三墩村、四方墩村以及兴和县黄土窑一带的多件孔兹岩样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 碎屑锆石年龄主要集中在 $2.0 \sim 2.3$ Ga, 并记录 $1.95 \sim 1.80$ Ga 多期变质年龄. 因此, 本区含石墨矽线石榴钾长片麻岩—变粒岩—大理岩组合形成年龄介于 $1.95 \sim 1.99$ Ga, 为古元古代变质岩系. 怀安杂岩中孔兹岩的碎屑锆石年龄小于新太古代变质深成岩体的年龄, 区内孔兹岩不是由附近新太古代岩石提供碎屑物质的原地沉积物, 更有可能是经古元古代造山运动卷入的外来构造岩片, 这与乌拉山一大青山地区孔兹岩一致(吴昌华等, 2006).

区域年代学数据以及岩石学对比研究表明, 新厘定的新太古代石榴黑云片麻岩—变粒岩组合在岩石组合、变质矿物组成以及碎屑锆石年龄结构等多方面与古元古代孔兹岩存在明显差别(图 10), 两套表壳岩形成时代不同, 且来源于不同的物源区.

4.3 怀安杂岩中早前寒武纪变质表壳岩地层单元划分

在 1:20 万张家口幅、大同幅、天镇幅以及 1:25 万张家口市幅等多个区调工作中, 均以传统地层学观点对区内变质岩系进行地层单元划分, 建立了不同的群、组、段等地层单元, 且变质地层形成时代均置于太古代. 进入 20 世纪 80 年代后期, 地质研究者开始注重变质岩原岩建造的研究, 逐渐将区内早前寒武纪高级变质岩系解体为不同时代的变质深成岩(变质 TTG 片麻岩)和变质表壳岩, 并建立了构造—岩石地层单位, 划分出新太古代和古元古代不同时代的变质表壳岩单元.

通过本次区调工作, 笔者进一步明确了晋冀蒙交界地区早前寒武纪变质基底的主体为变质深成岩杂岩体(TTG 片麻岩), 变质表壳岩则零星出露. 岩石学及锆石 U-Pb 年代学研究表明, 本区各类变质表壳岩均卷入古元古代造山作用, 变质峰期年龄为 $1.85 \sim 1.81$ Ga, 变质程度达高压麻粒岩相—麻粒岩相, 并发生地壳深部层次下的塑性变形作用, 构造置换作用强烈, 原始的地层层序难以恢复. 区内变质表壳岩野外露规模小、连续性差, 传统的地层划分的方法已不能适用. 因此, 本文采用特征变质矿物+岩石组合+构造的填图方法, 对新识别出的 4 套变质表壳岩组合进行了重新厘定(表 2).

二辉麻粒岩—磁铁石英岩组合在怀安杂岩中分

布广泛,是本地区铁矿主要开采层位,其中 BIF 作为该套岩石中最具代表性的岩石类型,具有较大的经济价值,因此本文将该套岩石组合厘定为铁英岩岩段,形成时代确定为新太古代。石榴黑云片麻岩—变粒岩组合在野外产状、岩石组合、变质矿物组成以及锆石年龄结构等方面与古元古代孔兹岩明显区别,本文将该套岩石厘定为石榴黑云片麻岩岩组,形成时代为新太古代末期。桑干岩群长期作为晋冀蒙地区太古代变质地层的一级单位,本文建议保留。石榴角闪二辉麻粒岩—大理岩组合原岩主要为一套基性火山岩夹碳酸盐岩建造,本文将该套岩石厘定为高压基性麻粒岩—大理岩岩段,原岩形成年龄可能早于 ~ 2.03 Ga。地球化学研究表明基性火山岩具有亚碱性拉斑玄武岩的地球化学属性,并在稀土配分模式图和微量元素蛛网图上具有 MORB 特征,结合基性火山岩伴生大理岩和少量变泥质岩石的岩石组合,笔者认为该套岩石组合可能具有洋壳的性质,代表古元古代洋壳残片。含石墨矽线石榴钾长片麻岩—变粒岩—大理岩组合为一套典型的孔兹岩组合,本文将该套岩石厘定为含石墨矽线石榴片麻岩—变粒岩—大理岩岩段。根据区域地层对比研究,本文将高压基性麻粒岩—大理岩岩段和含石墨矽线石榴片麻岩—变粒岩—大理岩岩段划归为集宁岩群黄土窑岩组,时代为古元古代。

怀安杂岩中新太古代和古元古代变质表壳岩地层单元的重新厘定,尤其是新太古代泥—砂质陆缘碎屑岩和古元古代洋壳残片的确定,对进一步深化晋冀蒙交界地区早前寒武纪变质基底物质组成及地壳演化研究具有重要意义,同时新的填图方法对高级区变质地层的划分与对比具有一定的指导意义。

5 结论

基于区调工作,结合岩石学、年代学以及区域地层对比研究,本文对华北克拉通北部怀安杂岩中早前寒武纪变质表壳岩进行了重新划分,厘定出两期具有不同成因性质的变质表壳岩单元:

(1) 新太古代桑干岩群包括磁铁石英岩岩组和石榴黑云片麻岩岩组,均记录了 ~ 2.5 Ga 年龄信息。其中磁铁石英岩岩组的原岩为一套基性火山岩夹磁铁石英岩建造,产出阿尔戈马型 BIF 铁矿,形成年龄为 2489 ± 19 Ma; 石榴黑云片麻岩岩组原岩为一套泥—砂质陆缘碎屑岩建造,其物源应为新太古代 TTG 岩石。

(2) 古元古代集宁岩群黄土窑岩组可划分为石榴高压基性麻粒岩—大理岩岩段和含石墨矽线石榴片麻岩—变粒岩—大理岩岩段。石榴高压基性麻粒岩—大理岩岩段的原岩为一套基性火山岩夹大理岩建造,原岩形成年龄早于 ~ 2.03 Ga; 含石墨矽线石榴片麻岩—变粒岩—大理岩岩段为一套“有层无序”的孔兹岩组合,碎屑锆石主要集中在 $2.30 \sim 1.99$ Ga,与区域孔兹岩年龄格架一致。

(3) 新太古代和古元古代变质表壳岩均卷入古元古代造山作用($1.95 \sim 1.80$ Ga),遭受强烈的麻粒岩相变质及构造置换作用。怀安杂岩中孔兹岩可能是造山过程中卷入的构造岩片。

致谢:本文为 1:5 万天镇、怀安镇、东六马坊幅区域地质矿产调查项目的研究成果。吉林大学金巍教授和李伟民副教授对区调项目给予了长期地支持与帮助;本研究也得到天津地质调查中心赵凤清研究员和李怀坤研究员、中国地质科学院地质研究所耿元生研究员和万渝生研究员、中国科学院地质与地球物理研究所郭敬辉研究员的关心与帮助;锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测试得到天津地质调查中心同位素实验室周红英研究员、崔玉荣、耿建珍、李国占等人的帮助;匿名审稿专家也提出了许多有益的建议;在此一并表示感谢!

附补充信息表见: <http://www.earth-science.net/WebPage/view.aspx? id=20190117055940.pdf>

References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that Do not Report 204 Pb. *Chemical Geology*, 192 (1–2): 59–79. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00195-x](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00195-x)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Nei Mongol Autonomous Region, 1985. Regional geology of Nei Mongol autonomous region. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Nei Mongolia Autonomous Region, 1996. Stratigraphy (Lithostratigraphic) of Nei Mongolia Autonomous Region. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Shanxi, 1989. Regional Geology of Shanxi Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Cai, J., Liu, F. L., Liu, P. H., 2017. Paleoproterozoic Multistage Metamorphic Events in Jining Metapelitic Rocks from the Khondalite Belt in the North China Craton: Evidence from

- Petrology, Phase Equilibria Modelling and U-Pb Geochronology. *Journal of Asian Earth Sciences*, 138: 515—534. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2017.02.034>
- Cai, J., Liu, F.L., Liu, P.H., et al., 2015. Geochronology of the Paleoproterozoic Khondalite Rocks from the Wulashan-Daqingshan Area, the Khondalite Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (10): 3081—3106 (in Chinese with English abstract).
- Cai, J., Liu, P.H., Ji, L., et al., 2017. Zircon Geochronology of the Paleoproterozoic High-Grade Supracrustal Rocks from the Huai'an Terrane, Northwestern Hebei. *Acta Petrologica Sinica*, 33 (9): 2811—2826 (in Chinese with English abstract).
- Condie, K.C., Boryta, M.D., Liu, J.Z., et al., 1992. The Origin of Khondalites: Geochemical Evidence from the Archean to Early Proterozoic Granulite Belt in the North China Craton. *Precambrian Research*, 59 (3—4): 207—223. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(92\)90057-u](https://doi.org/10.1016/0301-9268(92)90057-u)
- Dong, C.Y., Liu, D.Y., Li, J.J., et al., 2007. Palaeoproterozoic Khondalite Belt in the Western North China Craton: New Evidence from SHRIMP Dating and Hf Isotope Composition of Zircons from Metamorphic Rocks in the Bayan Ul-Helan Mountains Area. *Chinese Science Bulletin*, 52 (21): 2984—2994. <https://doi.org/10.1007/s11434-007-0404-9>
- Dong, C.Y., Wan, Y.S., Xu, Z.Y., et al., 2013. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Late Paleoproterozoic Kondalites in the Daqing Mountains Area on the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 56 (1): 115—125. <https://doi.org/10.1007/s11430-012-4459-3>
- Dong, Q.X., Zhou, J.C., 1984. Stratigraphic Division of the Original Wulashan Group in the Wula Mountains, Nei Monggol (Inner Mongolia). *Regional Geology of China*, (3): 19—37 (in Chinese with English abstract).
- Geng, Y.S., Lu, S.N., 2014. Advances in the Study of Precambrian Chronostratigraphy in China: A Review. *Earth Science Frontiers*, 21 (2): 102—118 (in Chinese with English abstract).
- Guo, J.H., O'Brien, P.J., Zhai, M.G., 2002. High-Pressure Granulites in the Sanggan Area, North China Craton: Metamorphic Evolution, *P-T* Paths and Geotectonic Significance. *Journal of Metamorphic Geology*, 20 (8): 741—756. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2002.00401.x>
- Guo, J. H., Sun, M., Chen, F. K., et al., 2005. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of High-Pressure Granulites in the Sanggan Area, North China Craton: Timing of Paleoproterozoic Continental Collision. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24 (5): 629—642. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2004.01.017>
- Guo, J. H., Zhai, M. G., Li, J. H., et al., 1996. Nature of the Early Precambrian Sanggan Structure Zone in North China Craton: Evidence from Rock Association. *Acta Petrologica Sinica*, 12 (2): 193—207 (in Chinese with English abstract).
- Guo, J. H., Zhai, M. G., Zhang, Y. G., et al., 1993. Early Precambrian Manjinggou High-Pressure Granulites Melange Belt on the Southern Edge of the Huai'an Complex, North China Craton: Geological Features, Petrology and Isotopic Geochronology: *Acta Petrologica Sinica*, 9 (4): 329—341 (in Chinese with English abstract).
- Han, C.M., Xiao, W.J., Su, B.X., et al., 2014. Neoarchean Algoma-Type Banded Iron Formations from Eastern Hebei, North China Craton: SHRIMP U-Pb Age, Origin and Tectonic Setting. *Precambrian Research*, 251 (3): 212—231. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.06.019>
- Han, C.M., Xiao, W.J., Su, B.X., et al., 2017. Neoarchean Algoma-Type Banded Iron Formation from the Northern Shanxi, the Trans-North China Orogen: SIMS U-Pb Age, Origin and Tectonic Setting. *Precambrian Research*, 303: 548—572. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.06.023>
- Kröner, A., Wan, Y.S., Liu, X.M., et al., 2014. Dating of Zircon from High-Grade Rocks: Which is the Most Reliable Method? *Geoscience Frontiers*, 5 (4): 515—523. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.03.012>
- Li, J.H., Qian, X.L., Liu, S.W., 2000. Geochemistry of Khondalites from the Central Portion of North China Craton (NCC): Implications for the Continental Cratonization in the Neoarchean. *Science China Earth Sciences*, 43 (3): 253—265. <https://doi.org/10.1007/bf02906821>
- Li, H.K., Zhu, S.X., Xiang, Z.Q., et al., 2010. Zircon U-Pb Dating on Tuff Bed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Beijing: Further Constraints on the New Subdivision of the Mesoproterozoic Stratigraphy in the Northern North China. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (7): 2131—2140 (in Chinese with English abstract).
- Li, P., Zhong, F.D., 1965. Division of Metamorphic Rock Series and Metamorphic Phase in the Jining Area. *Chinese Journal of Geology*, 6 (1): 1—14 (in Chinese).
- Liu, F., Guo, J. H., Lu, X. P., et al., 2009. Crustal Growth at ~2.5 Ga in the North China Craton: Evidence from Whole-Rock Nd and Zircon Hf Isotopes in the Huai'an Gneiss Terrane. *Chinese Science Bulletin*, 54 (24): 4704—4713. <https://doi.org/10.1007/s11434-009-0288-y>
- Liu, F., Guo, J. H., Peng, P., et al., 2012. Zircon U-Pb Ages and Geochemistry of the Huai'an TTG Gneisses Terrane: Petrogenesis and Implications for ~2.5 Ga Crustal

- Growth in the North China Craton. *Precambrian Research*, 212—213:225—244. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.06.006>
- Liu, L., Zhang, L.C., Dai, Y.P., et al., 2012. Formation Age, Geochemical Signatures and Geological Significance of the Sanheming BIF-Type Iron Deposit in the Guyang Greenstone Belt, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3623—3637 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.G., 1989. Origin and Crustal Evolution of Early Precambrian Metamorphic Complex from Northwestern Hebei Province and the Adjacent Area, China: A Study of Petrology, Geochemistry and Isotopic Geochronology (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. G., Guo, J. H., 1993. Precambrian Geology in the Northwest Shanxi Province. In: Zhao, Z.P., ed., Precambrian Crustal Evolution of Sino-Korean Paraplatform. Science Press, Beijing, 284—330 (in Chinese).
- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Zong, K.Q., et al., 2010. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535—1546. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-3052-4>
- Lu, L.Z., Xu, X.C., Liu, F.L., 1996. The Early Precambrian Khondalite Series in the North China. Changchun Publishing House, Changchun, 16—118 (in Chinese).
- Lu, S.N., Li, H.K., Li, H.M., et al., 2003. U-Pb Isotopic Ages and Their Significance of Alkaline Granite in the Southern Margin of the North China Craton. *Geological Bulletin of China*, 22(10): 762—768 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S.N., Zhao, G.C., Wang, H.C., et al., 2008. Precambrian Metamorphic Basement and Sedimentary Cover of the North China Craton: A Review. *Precambrian Research*, 160(1/2): 77—93. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.017>
- Ludwig, K.R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.
- Ma, X.D., Fan, H.R., Santosh, M., et al., 2014. Chronology and Geochemistry of Neoarchean BIF-Type Iron Deposits in the Yinshan Block, North China Craton: Implications for Oceanic Ridge Subduction. *Ore Geology Reviews*, 63(1): 405—417. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.02.010>
- Peng, P., Wang, X.P., Windley, B.F., et al., 2014. Spatial Distribution of ~1 950—1 800 Ma Metamorphic Events in the North China Craton: Implications for Tectonic Subdivision of the Craton. *Lithos*, 202—203: 250—266. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.05.033>
- Peng, P., Zhai, M.G., Zhang, H.F., et al., 2004. Geochemistry and Geological Significance of the 1.8 Ga Mafic Dyke Swarms in the North China Craton: An Example from the Juncture of Shanxi, Hebei and Inner-Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 439—456 (in Chinese with English abstract).
- Qian, X.L., Li, J.H., 1999. Discovery of Neoarchean Unconformity and Its Implication for Continental Cratonization of North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 42(4): 399—407.
- Shen, Q.H., Geng, Y.S., Liu, G.H., et al., 1996. Stratigraphical Lexicon of China: Archean. Geological Publishing House, Beijing, 42—44 (in Chinese).
- Shen, Q.H., Geng, Y.S., Song, H.X., 2018. Progress on Metamorphic Petrology and Metamorphic Geology of China in the Last nearly 70 Year. *Earth Science*, 43(1): 1—23 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.001>
- Shen, Q.H., Zhang, Y.F., Gao, J.F., et al., 1989. Study on Archean Metamorphic Rocks in Mid-Southern Inner Mongolia of China. *Bulletin of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences*, 21:3—11 (in Chinese).
- Shi, Z.Q., Shi, Y.R., 2016. SHRIMP U-Pb Ages of Zircons from Banded Magnetite Quartzite of Shachang Formation in Miyun Area of Beijing and Their Significance. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 38(4): 547—557 (in Chinese with English abstract).
- Stratigraphic Table Compilation Group of Nei Mongol Autonomous Region, 1978. Area Formation table in North China (Inner Mongoli Fascicle). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Su, Y.P., Zheng, J.P., Griffin, W.L., et al., 2014. Zircon U-Pb Ages and Hf Isotope of Gneissic Rocks from the Huai'an Complex: Implications for Crustal Accretion and Tectonic Evolution in the Northern Margin of the North China Craton. *Precambrian Research*, 255: 335—354. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.10.007>
- Sun, Y.Z., 1959. Division and Comparison of the Precambrian Strata in China. *Geological Review*, 19(1): 28—34 (in Chinese).
- Wan, Y.S., Dong, C.Y., Xie, H.Q., et al., 2018. Formation Age of BIF-Bearing Anshan Group Supracrustal Rocks in Anshan-Benxi Area: New Evidence from SHRIMP U-Pb Zircon Dating. *Earth Science*, 43(1): 51—87 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.004>

- Wan, Y.S., Geng, Y.S., Liu, F.L., et al., 2000. Age and Composition of the Khondalite Series of the North China Craton and Its Adjacent Area. *Progress in Precambrian Research*, 23 (4): 221—237 (in Chinese with English abstract).
- Wan, Y.S., Liu, D.Y., Dong, C.Y., et al., 2011. U-Th-Pb Behavior of Zircons under High-Grade Metamorphic Conditions: A Case Study of Zircon Dating of Meta-Diorite near Qixia, Eastern Shandong. *Geoscience Frontiers*, 2(2): 137—146. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.02.004>
- Wan, Y.S., Song, B., Liu, D.Y., et al., 2006. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of Palaeoproterozoic Metasedimentary Rocks in the North China Craton: Evidence for a Major Late Palaeoproterozoic Tectonothermal Event. *Precambrian Research*, 149(3—4): 249—271. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.06.006>
- Wang, J., Wu, Y.B., Gao, S., et al., 2010. Zircon U-Pb and Trace Element Data from Rocks of the Huai'an Complex: New Insights into the Late Paleoproterozoic Collision between the Eastern and Western Blocks of the North China Craton. *Precambrian Research*, 178(1—4): 59—71. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.01.007>
- Wang, L.J., Guo, J.H., Peng, P., et al., 2015. Lithological Units at the Boundary Zone between the Jining and Huai'an Complexes (Central-Northern Margin of the North China Craton): A Paleoproterozoic Tectonic Mélange? *Lithos*, 227: 205—224. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.04.006>
- Wang, Q.C., 1959. Discovery of Several Pre-Sinian Metamorphic Rocks in Northwestern Hebei Province. *Geological Review*, 19(7): 51 (in Chinese).
- Wang, R.M., Chen, Z.Z., Chen, F., 1991. Grey Tonalitic Gneiss and High-Pressure Granulite Inclusions in the Hengshan, Shanxi Province, and Their Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 7(4): 38—103 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Zhu, W.B., Luo, M., et al., 2014a. Approximately 1.78 Ga Mafic Dykes in the Lüliang Complex, North China Craton: Zircon Ages and Lu-Hf Isotopes, Geochemistry, and Implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(8): 3123—3144. <https://doi.org/10.1002/2014gc005378>
- Wang, C.L., Zhang, L.C., Dai, Y.P., et al., 2014b. Source Characteristics of the ~2.5 Ga Wangjiazhuang Banded Iron Formation from the Wutai Greenstone Belt in the North China Craton: Evidence from Neodymium Isotopes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 93: 288—300. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2014.07.038>
- Wei, C.J., 2018. Paleoproterozoic Metamorphism and Tectonic Evolution in Wutai-Hengshan Region, Trans-North China Orogen. *Earth Science*, 43(1): 24—43 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.002>
- Wei, Y., Zheng, J.P., Su, Y.P., et al., 2013. Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes of Granulites from the Huai'an Complex: Implications for the Accretion and Reworking of the Lower Crust beneath the North Margin of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2281—2294 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C.H., Sun, M., Li, H.M., et al., 2006. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Ages of the Khondalites from the Wulashan and Jining High-Grade Terrain in Northern Margin of the North China Craton: Constraints on Sedimentary Age of the Khondalite. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2639—2654 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C.H., Zhong, C.T., 1997. Discussion on the Age of Khondalite in Jin-Meng (Shanxi-Nei Mongol) High-Grade Terrain. *Acta Petrologica Sinica*, 13(3): 289—302 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J.L., Zhang, H.F., Zhai, M.G., et al., 2016. Discovery of Pelitic High-Pressure Granulite from Manjinggou of the Huai'an Complex, North China Craton: Metamorphic P-T Evolution and Geological Implications. *Precambrian Research*, 278: 323—336. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.03.001>
- Xia, X.P., Sun, M., Zhao, G.C., et al., 2006. LA-ICP-MS U-Pb Geochronology of Detrital Zircons from the Jining Complex, North China Craton and Its Tectonic Significance. *Precambrian Research*, 144(3—4): 199—212. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2005.11.004>
- Yan, Y.H., Liu, W.J., 1996. Discussion on the Early Precambrian Grey Gneiss and Khondalite in Nei Mongol-Shanxi-Hebei Junction Region, North China. *Acta Petrologica Sinica*, 12(2): 329—342 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J.H., Wu, F.Y., Liu, X.M., et al., 2005. Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes and Their Geological Significance of the Miyun Rapakivi Granites from Beijing, China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 1633—1644 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z.S., Xu, Z.Y., Liu, Z.Y., 2000. Khondalite Event and Archean Crust Structure Evolvement. *Progress in Precambrian Research*, 23(4): 206—212 (in Chinese with English abstract).
- Yin, C.Q., Zhao, G.C., Guo, J.H., et al., 2011. U-Pb and Hf Isotopic Study of Zircons of the Helanshan Complex: Constraints on the Evolution of the Khondalite Belt in the Western Block of the North China Craton. *Lithos*,

- 122(1—2): 25—38. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.11.010>
- Yin, C. Q., Zhao, G. C., Sun, M., et al., 2009. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Ages of the Qianlidian Complex: Constraints on the Evolution of the Khondalite Belt in the Western Block of the North China Craton. *Precambrian Research*, 174(1—2): 78—94. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.06.008>
- Zhai, M. G., 2011. Cratonization and the Ancient North China Continent: A Summary and Review. *Science China Earth Sciences*, 54(8): 1110—1120. <https://doi.org/10.1007/s11430-011-4250-x>
- Zhai, M. G., Peng, P., 2007. Paleoproterozoic Events in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2665—2682 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Wang, H. Z., Santosh, M., et al., 2016. Zircon U-Pb Ages of Paleoproterozoic Mafic Granulites from the Huai'an Terrane, North China Craton (NCC): Implications for Timing of Cratonization and Crustal Evolution History. *Precambrian Research*, 272: 244—263. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.11.004>
- Zhang, H. F., Zhai, M. G., Santosh, M., et al., 2012. Low-Al and High-Al Trondhjemites in the Huai'an Complex, North China Craton: Geochemistry, Zircon U-Pb and Hf Isotopes, and Implications for Neoarchean Crustal Growth and Remelting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 203—213. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2011.11.004>
- Zhang, H. F., Zhai, M. G., Santosh, M., et al., 2014. Paleoproterozoic Granulites from the Xinghe Graphite Mine, North China Craton: Geology, Zircon U-Pb Geochronology and Implications for the Timing of Deformation, Mineralization and Metamorphism. *Ore Geology Reviews*, 63: 478—497. <https://doi.org/10.1016/j.oregeo-rev.2014.03.014>
- Zhang, J. H., Jin, W., Wang, Y. F., et al., 2018. Formation and Evolution of Eo-Paleoarchean Granitic Crust in the Anshan Area: Evidence from Petrology, Geochronology and Geochemistry of the Shengousi Complex. *Acta Geological Sinica*, 92(5): 887—907 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. C., Zhai, M. G., Wan, Y. S., et al., 2012. Study of the Precambrian BIF-Iron Deposits in the North China Craton: Progresses and Questions. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3431—3445 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. C., Cawood, P. A., Wilde, S. A., et al., 2001. High-Pressure Granulites (Retrograded Eclogites) from the Hengshan Complex, North China Craton: Petrology and Tectonic Implications. *Journal of Petrology*, 42(6): 1141—1170. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.6.1141>
- Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Key Issues Revisited. *Precambrian Research*, 136: 177—202. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.10.002>
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Guo, J. H., et al., 2010. Single Zircon Grains Record Two Paleoproterozoic Collisional Events in the North China Craton. *Precambrian Research*, 177: 266—276. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.12.007>
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Sun, M., et al., 2008. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of the Huai'an Complex: Constraints on Late Archean to Paleoproterozoic Magmatic and Metamorphic Events in the Trans-North China Orogen. *American Journal of Science*, 308(3): 270—303. <https://doi.org/10.2475/03.2008.04>
- Zhao, T. P., Chen, F. K., Zhai, M. G., et al., 2004. Single Zircon U-Pb Ages and Their Geological Significance of the Damiao Anorthosite Complex, Hebei Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 685—690 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. P., 1954. The Problems of the Precambrian Strata in China. *Acta Geologica Sinica*, 34(2): 169—195 (in Chinese).
- Zhao, Z. P., 1993. Precambrian Regional Geology of Sino-Korean Paraplatform. In: Zhao, Z. P., ed., *Precambrian Crustal Evolution of Sino-Korean Paraplatform*. Science Press, Beijing, 352—356 (in Chinese).
- ## 附中文参考文献
- 蔡佳,刘福来,刘平华,等,2015.内蒙古孔兹岩带乌拉山一大青山地区古元古代孔兹岩系年代学研究.岩石学报,31(10): 3081—3106.
- 蔡佳,刘平华,冀磊,等,2017.冀西北怀安地体高级变质表壳岩的锆石年代学研究.岩石学报,33(9): 2811—2826.
- 董启贤,周俊昌,1984.内蒙古乌拉山区原乌拉山群地层划分新议.中国区域地质,(3): 19—37.
- 耿元生,陆松年,2014.中国前寒武纪地层年代学研究的进展和相关问题.地学前缘,21(2): 102—118.
- 郭敬辉,翟明国,李江海,等,1996.华北克拉通早前寒武纪桑干构造带的岩石组合特征和构造性质.岩石学报,12(2): 193—207.
- 郭敬辉,翟明国,张毅刚,等,1993.怀安蔓菁沟早前寒武纪高压麻粒岩混杂岩带地质特征、岩石学和同位素年代学.岩石学报,9(4): 329—341.
- 李怀坤,朱士兴,相振群,等,2010.北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石U-Pb定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束.岩石学报,26(7): 2131—2140.
- 李璞,钟富道,1965.集宁地区变质岩系的初步划分及其变质相的探讨.地质科学,6(1): 1—14.

- 刘利,张连昌,代堰锫,等,2012.内蒙古固阳绿岩带三合明 BIF 型铁矿的形成时代、地球化学特征及地质意义.岩石学报,28(11): 3623—3637.
- 刘宇光,1989.中国冀西北及邻区早前寒武纪变质杂岩的成因和地壳演化:岩石学、地球化学、同位素地质年代学研究(博士学位论文).北京:中国地质科学院.
- 刘宇光,郭敬辉,1993.冀西北地区早前寒武纪地质.赵宗溥著.中朝准地台前寒武纪地壳演化.北京:科学出版社, 284—330.
- 卢良兆,徐学纯,刘福来,1996.中国北方早前寒武纪孔兹岩系.长春:长春出版社,16—118.
- 陆松年,李怀坤,李惠民,等,2003.华北克拉通南缘龙王石童碱性花岗岩 U-Pb 年龄及其地质意义.地质通报,22 (10): 762—768.
- 内蒙古自治区地层表编写组,1978.华北地区区域地层表:内蒙古分册.北京:地质出版社.
- 内蒙古自治区地质矿产局,1985.内蒙古自治区区域地质志.北京:地质出版社.
- 内蒙古自治区地质矿产局,1996.内蒙古自治区岩石地层.北京:地质出版社.
- 彭澎,翟明国,张华锋,等,2004.华北克拉通 1.8 Ga 镁铁质岩墙群的地球化学特征及其他地质意义:以晋冀蒙交界地区为例.岩石学报,20(3): 439—456.
- 山西省地质矿产局,1989.山西省区域地质志.北京:地质出版社.
- 沈其韩,耿元生,刘国惠,等,1996.中国地层典:太古宇.北京:地质出版社,42—44.
- 沈其韩,耿元生,宋会侠,2018.近 70 年中国变质岩石学—变质地学的研究进展.地球科学,43(1): 1—23.
- 沈其韩,张荫芳,高吉凤,等,1989.内蒙古中南部太古宙变质岩.中国地质科学院地质研究所所刊,第 21 号,3—11.
- 史志强,石玉若,2016.北京密云地区沙厂组条带状磁铁石英岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义.地球科学与环境学报,38(4): 547—557.
- 孙云铸,1959.中国前寒武纪地层的划分和对比问题.地质论评,19(1): 28—34.
- 万渝生,董春艳,颉颃强,等,2018.鞍山一本溪地区鞍山群含 BIF 表壳岩形成时代新证据:锆石 SHRIMP U-Pb 定年.地球科学,43(1): 51—87.
- 万渝生,耿元生,刘福来,等,2000.华北克拉通及邻区孔兹岩系的时代及对太古宙基底组成的制约.前寒武纪研究进展,23(4): 221—237.
- 王启超,1959.河北省西北部几个前震旦纪变质岩系的发现.地质论评,19(7): 51.
- 王仁民,陈珍珍,陈飞,1991.恒山灰色片麻岩和高压麻粒岩包体及其地质意义.岩石学报,7(4): 38—103.
- 魏春景,2018.华北中部造山带五台—恒山地区古元古代变质作用与构造演化.地球科学,43(1): 24—43.
- 魏颖,郑建平,苏玉平,等,2013.怀安麻粒岩锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素:华北北缘下地壳增生再造过程研究.岩石学报,29(7): 2281—2294.
- 吴昌华,孙敏,李惠民,等,2006.乌拉山—集宁孔兹岩锆石激光探针等离子质谱(LA-ICP-MS)年龄——孔兹岩沉积时限的年代学研究.岩石学报,22(11): 2639—2654.
- 吴昌华,钟长汀,1997.晋蒙高级地体孔兹岩系的时代.岩石学报,13(3): 289—302.
- 阎月华,刘文军,1996.关于内蒙与晋冀交界地区早前寒武纪灰片麻岩和孔兹岩的讨论.岩石学报,12(2): 329—342.
- 杨进辉,吴福元,柳小明,等,2005.北京密云环斑花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义.岩石学报,21 (6): 1633—1644.
- 杨振升,徐仲元,刘正宏,2000.孔兹岩系事件与太古宙地壳构造演化.前寒武纪研究进展,23(4): 206—212.
- 翟明国,彭澎,2007.华北克拉通古元古代构造事件.岩石学报,23(11): 2665—2682.
- 张家辉,金巍,王亚飞,等,2018.鞍山地区始—古太古代花岗质地壳的形成及演化——深沟寺杂岩的岩石学、年代学及地球化学证据.地质学报,92(5): 887—907.
- 张连昌,翟明国,万渝生,等,2012.华北克拉通前寒武纪 BIF 铁矿研究:进展与问题.岩石学报,28(11): 3431—3445.
- 赵太平,陈福坤,翟明国,等,2004.河北大庙斜长岩杂岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义.岩石学报,20(3): 685—690.
- 赵宗溥,1954.中国前寒武纪地层问题.地质学报,34(2): 169—195.
- 赵宗溥,1993.中朝准地台前寒武纪区域地质.赵宗溥著.中朝准地台前寒武纪地壳演化.北京:科学出版社, 352—356.