

冀西北晚太古代岩石单元的地质关系：对早期陆壳形成的指示*

彭澎 李云 刘富 王芳

PENG Peng, LI Yun, LIU Fu and WANG Fang

中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2012-06-30 收稿, 2012-08-27 改回.

Peng P, Li Y, Liu F and Wang F. 2012. Geological relation of Late Archean lithologic units in Northwest Hebei, North China Craton: Implication for building of early continental crust. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11):3531–3544

Abstract In Northwest Hebei Province, North China Craton, the Late Archean units include grey gneisses-dominated Sanggan and Chongli complexes and amphibolite-facies volcano-sedimentary sequence, the Hongqiyngzi Group. In this paper, zircon grains from a meta-basaltic-andesite sample (amphibole plagioclase gneiss) from the Hongqiyngzi Group in Huangtuyao-Wushijia area, Shangyi, was dated using LA-MC-ICPMS method. A weighted mean $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age of $2528 \pm 12\text{Ma}$ (2σ , MSWD = 0.1, $n = 34$) was obtained, and this age is interpreted as igneous age of the rock. Although this age is close to the ages of the grey gneisses in this area, field relations clearly show that the Hongqiyngzi Group has formed earlier. In the grey gneiss domain, pieces of the Hongqiyngzi Group and other meta-gabbros appear as sheets, lens or “dyke”-like bands. These lens and bands sometimes have numbers of lined smaller lens around the main bodies, with no fine-grained margins and intrusive branches, which can distinguish from the Paleoproterozoic mafic dykes (also metamorphosed) in this same area. These gabbroic sheets could be roots or partly the magma chamber relics of the Hongqiyngzi Group, or they could also be partly the remnants of ancient crust. Element and isotope geochemistry show that the volcanics are akin of grey gneisses or dioritic intrusions in the grey gneisses in this area. Both geological relations and geochemistry show that these volcanic rocks may have similar origins with the grey gneisses and dioritic rocks. According to the geological relationships of the Late Archean units in this area, the volcano-sedimentary sequence (the Hongqiyngzi Group) and the grey gneiss complex (Sanggan and Chongli complexes) composed a 2-dimension Late Archean crust structure. Identifying the spatial continuity of such crustal structure, as well as the time and material evolution of the related units, can reveal the forming mechanism of Late Archean continental crust in the North China Craton.

Key words North China Craton; Late Archean; Crust structure; Volcano-sedimentary sequences; grey gneisses (TTG gneisses); Hongqiyngzi Group

摘要 冀西北地区出露晚太古代桑干杂岩和崇礼杂岩构成的灰色片麻岩(TTG片麻岩)-麻粒岩地体和红旗营子群角闪岩相变质火山沉积岩系。本文对尚义地区红旗营子群中变质火山岩中的变玄武安山岩(角闪斜长片麻岩)进行了锆石 LA-MC-ICPMS 定年, 获得 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 $2528 \pm 12\text{Ma}$ (2σ , MSWD = 0.1, $n = 34$), 这一年龄代表了该岩石的形成时代。虽然这一年龄非常接近灰色片麻岩的形成时代, 野外地质关系指示红旗营子群的形成早于灰色片麻岩及其中的闪长质侵入体。在灰色片麻岩分布区, 红旗营子群和一些变质辉长质岩石呈岩片、透镜体或者“岩墙”状分布。变质辉长质透镜体或者“岩墙”状岩片以周边发育串珠状小透镜体, 以及不见细粒边部和岩墙“手指”可以与该区分布的早元古代变质基性岩墙相区别。这些变质辉长质岩石可能是红旗营子群火山岩系根部或者岩浆房的残留体, 也可能部分是更早期地壳的残片。红旗营子群火山岩系的岩石化学特征可以和灰色片麻岩及闪长质片麻岩岩体分别进行对比。地质关系和岩石化学特征表明, 这些岩石可能具有相似的成因。根据冀西北地区相关岩石单元的地质关系, 火山沉积岩系(红旗营子群)和灰色片麻岩-麻粒岩地体

* 本文受国家重点基础研究发展计划 973 项目(2012CB416601)、国家自然科学基金面上基金项目(41072146)和岩石圈演化国家重点实验室联合资助。

第一作者简介: 彭澎, 男, 1978 年生, 博士, 前寒武纪地质学与岩石学专业, E-mail: pengpengwj@mail.iggcas.ac.cn

(桑干杂岩和崇礼杂岩)组成了该地区晚太古代大陆二维地壳结构。认识这种地壳结构在空间上的延续性,并识别相关地质单元在时代和物质上的演化关系,可以揭示华北克拉通晚太古代大陆地壳的形成机制。

关键词 华北克拉通;晚太古代;地壳结构;变质火山沉积岩系;灰色片麻岩(TTG片麻岩);红旗营子群

中图法分类号 P534.1; P547; P597.3

1 引言

太古宙大陆动力学是地质学的重要研究领域。一些学者认为,板块构造和地幔柱构造机制或者单独、或者共同控制着早期大陆的演化(Ayer *et al.*, 2002; Dirks *et al.*, 2002; Percival *et al.*, 2004; Witze, 2006; Zhao, 2007; Labrosse and Jaupart, 2007; van Kranendonk *et al.*, 2007; Windley and Garde, 2009; Wyman, 2012)。一些学者认为太古宙时期板块构造机制尚未建立(Stern, 2005),起作用的可能是类似地幔柱构造机制,如 Bédard(2006)提出了催化折沉模式。还有一些学者甚至认为,板块构造和地幔柱构造都不是太古宙的动力学机制(Hamilton, 2007, 2011)。早前寒武纪陆壳的组成与结构是理解早期地质演化和构造体制的关键(Bleeker, 2002; Windley and Garde, 2009)。陆壳的组成与结构可以通过捕虏体(Rudnick, 1992; Weber *et al.*, 2002)、地球物理(Allmendinger *et al.*, 1987)以及地质剖面(Percival *et al.*, 1992; Zhai *et al.*, 2001; Windley and Garde, 2009)等方法进行恢复。太古宙时期地质单元由灰色片麻岩-麻粒岩地体为主的高级区和绿岩带(或者浅变质火山-沉积岩系)与花岗岩为主的低级区组成(Windley, 1996),它们的时代、地质关系和成因联系对认识太古宙大陆地壳组成、结构与成因非常关键。

华北克拉通出露了大量的晚太古代中(低)级变质火山沉积岩系和片麻岩-麻粒岩地体,这些火山岩系大多包含条带状铁建造(BIF)(沈其韩等, 1992; 赵宗溥等, 1993; 沈保丰等, 1994; 白瑾等, 1996; 伍家善等, 1998; 李江海等, 2000)。这其中,冀西北地区片麻岩-麻粒岩地体经历了麻粒岩相-高角闪岩相变质(翟明国等, 1992, 1996),局部记录的高压麻粒岩相变质作用,峰期发生在早元古代(1.9~1.8Ga),主要抬升事件则发生在1.8Ga前后(Guo *et al.*, 2005)。但是本区一些火山沉积岩系,变质程度相对较低,它们无疑能够指示本区早元古代中下地壳结构。然而,这些岩石主要形成时期为~2500Ma(刘树文等, 2007; Zhao *et al.*, 2008; 刘富等, 2009; Zhang *et al.*, 2011),形成时就处在地球不同深度层次。因此,可以根据本区片麻岩-麻粒岩地体和中-低级变质的火山沉积岩系之间的地质关系,认识研究区晚太古代大陆地壳组成和结构。

2 地质背景

冀西北地区晚太古界主要包括桑干杂岩、崇礼杂岩和红旗营子群。该区晚太古界岩石西侧与早元古界晚期孔兹岩

系为主的杂岩构造接触,并有少量早元古界孔兹岩系为主的岩石构造叠置在怀安片麻岩-麻粒岩地体之中(Zhang *et al.*, 1994; Dirks *et al.*, 1997; Peng *et al.*, 2011)。

桑干杂岩和崇礼杂岩主体为灰色片麻岩,或称TTG片麻岩,以TTG(tonalite-trondhjemite-granodiorite,英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩的英文简写)质片麻岩为主,其时代集中在2520~2500Ma(中国地质大学(北京), 1994^①; Zhao *et al.*, 2008; 刘富等, 2009; 刘树文等, 2011),这些TTG质片麻岩被稍晚(2500~2440Ma)的少量小型闪长质、花岗闪长质和钾长花岗岩体侵入(耿元生和刘敦一, 1997; Zhao *et al.*, 2008; 刘富等, 2009; Zhang *et al.*, 2011; Wan *et al.*, 2011)。另外,灰色片麻岩中还分布着大量辉长质麻粒岩岩片和透镜体,除了部分在变质前可能是早元古代岩墙外(Peng *et al.*, 2005),大部分岩片的形成时代应该为晚太古代(耿元生和刘敦一, 1997; Dirks *et al.*, 1997; 刘富等, 2009)。本区的岩石普遍经历了麻粒岩相的变质作用,部分早元古代基性岩墙还记录了中-高压麻粒岩相变质,局部退变质为角闪岩相,因此也被称为片麻岩-麻粒岩地体(翟明国等, 1992; 郭敬辉等, 1993; Guo *et al.*, 2005)。研究表明,这些TTG片麻岩代表了约2800~2500Ma新生地壳部分熔融的产物(刘树文等, 2007; 刘富等, 2009; Zhang *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2012)。

红旗营子群(杂岩)分布在赤城-崇礼断裂以北,主要的岩石组合为黑云斜长片麻岩、角闪黑云斜长片麻岩、黑云变粒岩、夕线黑云变粒岩、石榴黑云斜长片麻岩、石榴黑云母片岩、条带状铁建造(BIF)、石英岩和不纯的大理岩等,是一套低-高角闪岩相变质的岩石。红旗营子群被大量晚古生代和早元古代花岗质岩体侵入,并局部发生混合岩化,形成杂岩体(Wang *et al.*, 2011);但年代学数据揭示其主体火山岩系形成于2535~2480Ma(刘树文等, 2007)。

另外,研究区内的晚太古界岩石被一些早元古界中晚期花岗质小型岩体和基性岩墙侵入(Peng *et al.*, 2005, 2012)。片麻岩-麻粒岩地体岩石经历了约1850~1800Ma角闪岩相-麻粒岩相的变质作用(翟明国等, 1992; 郭敬辉等, 1993; Guo *et al.*, 2005)。翟明国等(1996)和Zhai *et al.* (2001)提出怀安片麻岩-麻粒岩地体代表早前寒武纪下地壳。王仁民等(1997, 1999)认为怀安地体和崇礼杂岩构成了晚太古代侧向增生的弧后混杂岩带。

本文主要介绍位于尚义黄土窑-五十家地区的晚太古代地质剖面,并且尝试将观察的地质关系应用到变质程度相对

① 中国地质大学(北京). 1994. 1:5 土木路、乌良台幅地质图及区域地质调查报告

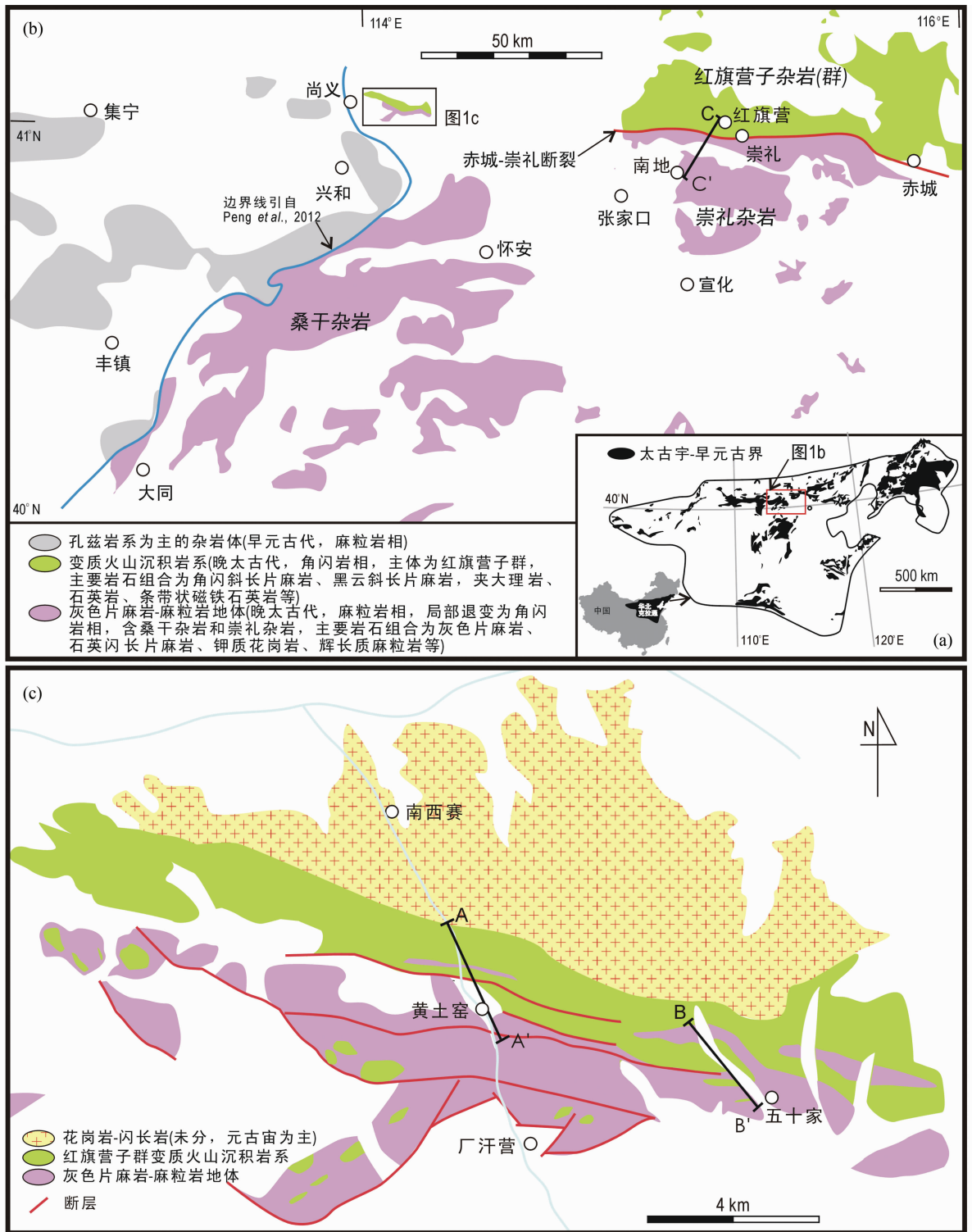


图 1 研究区早前寒武纪地质简图

(a)-研究区在华北克拉通中的位置;(b)-冀西北地区主要早前寒武纪地质单元简图;(c)-尚义黄土窑-五十家地区地质简图. 图中 AA'、BB' 和 CC' 线示图 2 中的剖面位置

Fig.1 Simplified map showing Early Precambrian geology of the study area

(a)-location of the study area in the North China Craton; (b)-main Early Precambrian geological units in Northwest Hebei Province; (c)-simplified geological maps of the Huangtuyao-Wushijia area, Shangyi County. Lines labeled with AA', BB' and CC' are localities of sections shown in Fig. 2

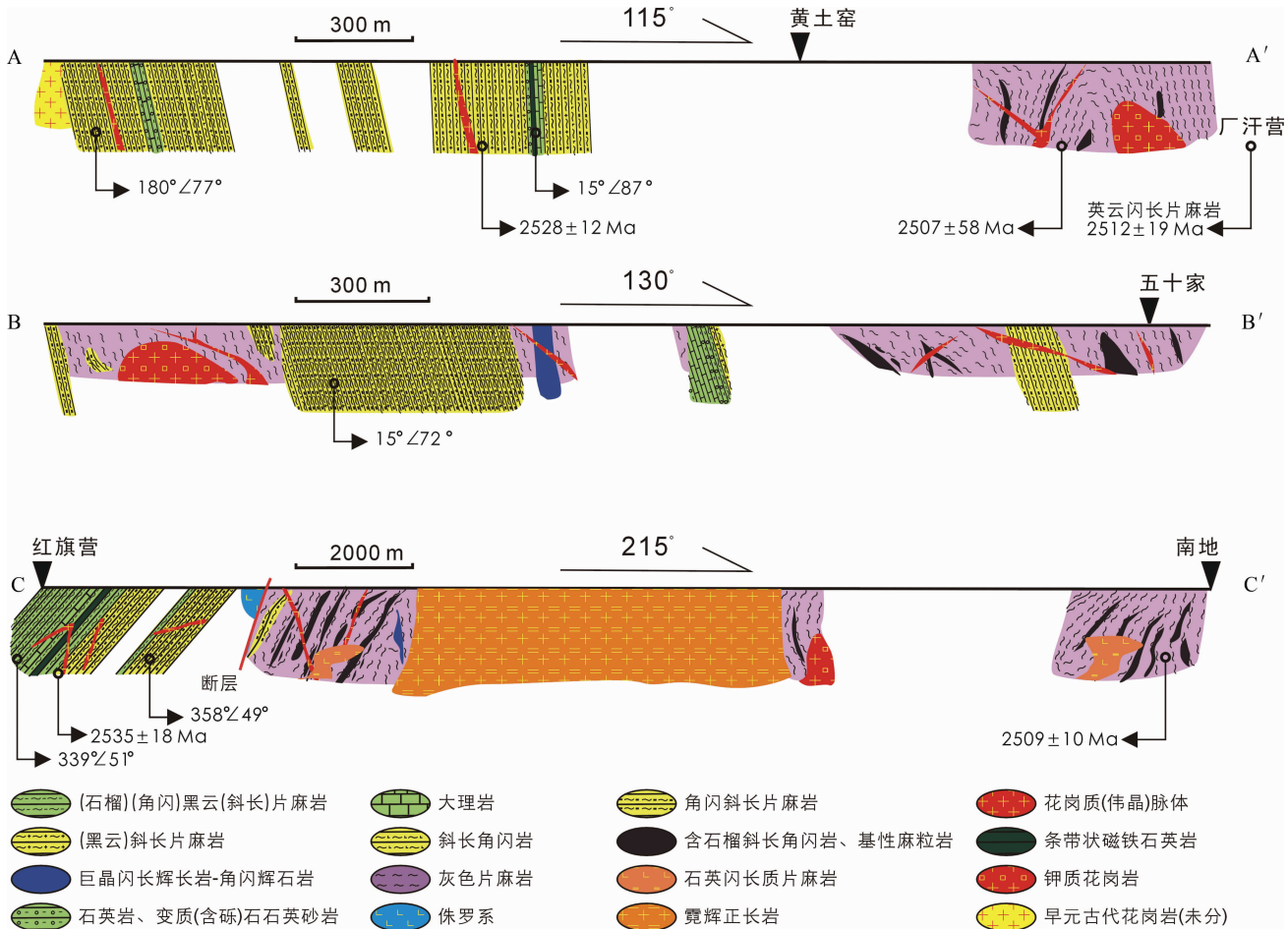


图2 冀西北地区晚太古代地质剖面简图

AA': 尚义黄土窑剖面; BB': 尚义五十家剖面; CC': 崇礼红旗营-南地剖面; 空白为覆盖区; 剖面位置见图 1c (AA' 和 BB') 及图 1a (CC') 中。其中, 2528 ± 12 Ma、2507 ± 58 Ma、2512 ± 19 Ma、2535 ± 18 Ma 和 2502 ± 10 Ma 的年龄分别引自本文、中国地质大学(北京)(1994)、Wang *et al.* (2009)、刘树文等(2007)和刘树文等(2011)

Fig. 2 Simplified geological profiles of the Late Archean sections in Northwest Hebei

AA': Huangtuyao Section in Shangyi County; BB': Wushijia Section in Shangyi County; CC': Hongqiying-Nandi Section in Chongli County; Blank areas are those covered by vegetation or soil; See Fig. 1c (Sections AA' and BB') and Fig. 1b (Section CC') for localities. Ages of 2528 ± 12 Ma, 2507 ± 58 Ma, 2512 ± 19 Ma, 2535 ± 18 Ma and 2502 ± 10 Ma are from this study, China University of Geosciences (Beijing) (1994); Wang *et al.* (2009); Liu *et al.* (2007) and Liu *et al.* (2011), respectively

较高、野外关系更为复杂的崇礼红旗营-南地地区的地质剖面,从而检验相关模型(图 1b, c)。黄土窑-五十家地区主要包括灰色片麻岩和红旗营子群两个单元,这些岩石被一些早元古代花岗质-闪长质岩体侵入。其中,英云闪长质片麻岩给出了 2507 ± 58 Ma (中国地质大学(北京),1994)和 2512 ± 19 Ma (Wang *et al.*, 2009)的锆石 U-Pb 年龄,代表形成时代。Wang *et al.* (2009)认为这一地区部分岩石可能属于晚太古代洋壳残片。红旗营-南地地区主要包括崇礼杂岩和红旗营子群两个单元,这些岩石被早元古代和晚古生代花岗质岩石侵入(刘树文等,2007;Wang *et al.*, 2011)。其中,红旗营子群杂岩黑云斜长片麻岩(角闪黑云花岗闪长质片麻岩)给出了 2535 ± 18 Ma 的锆石 U-Pb 年龄(刘树文等,2007),二长花岗

片麻岩给出了 2509 ± 10 Ma 的锆石 U-Pb 年龄(图 1b;刘树文等,2011),这两个年龄均被解释为岩浆作用时代。

3 典型地质剖面岩石组合与代表性岩石样品

图 2a, b 是尚义黄土窑-五十家地区两个代表性地质剖面简图。这两个剖面长度 2 ~ 3 km,从北到南都穿过了变火山沉积岩系和灰色片麻岩界线部位;图 2c 是崇礼红旗营-南地地区地质剖面简图,该剖面长度约 20 km,除晚古生代侵入的辉石正长岩-角闪辉石闪长正长岩岩体,以及构造叠置其上的晚侏罗系地层露地区以外,该剖面北段为红旗营子群变质火山沉积岩系,南段为桑干灰色片麻岩。

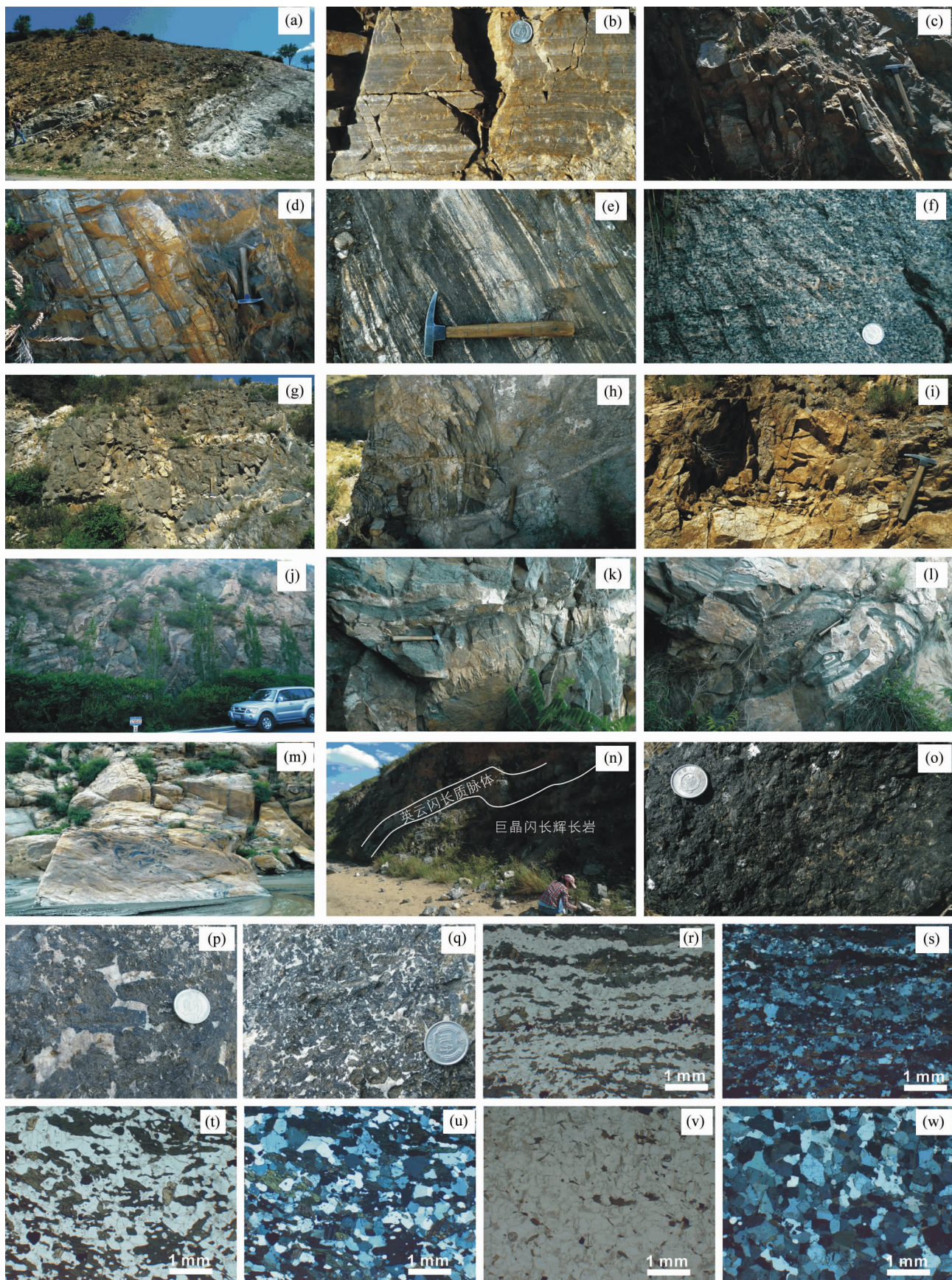


图3 尚义-崇礼地区太古宙变质火山沉积岩系和灰色片麻岩野外地质关系及代表性岩石样品显微照片

(a-c)-红旗营子群中的变质含砾砂岩-砂岩-石英岩-大理岩组合(a)及石英岩(b)和变质含砾砂岩-砂岩(c,含少量条带状铁建造(BIF))局部(尚义黄土窑剖面);(d-f)-红旗营子群中的变质火山岩系,显示中酸性和中基性火山岩互层(d,e),及变质安山质火山岩局部(f)(尚义黄土窑剖面);(g,h)-英云闪长质片麻岩侵入到变质中基性火山岩中(g),局部保留变质火山沉积岩地层结构(h)(尚义五十家剖面);(i-m)-英云闪长质片麻岩侵入到板片状变质辉长质岩浆岩中,变质辉长质岩岩石类型为二辉石麻粒岩、斜长角闪岩,少量为含石榴石二辉石麻粒岩,变质辉长岩片两侧可见被长英质片麻岩捕获变形形成的透镜体(j-m),i摄于尚义五十家,j-l摄于崇礼红旗营-南地剖面,m摄于尚义小蒜沟;(n-q)-巨晶闪长辉长岩-角闪石辉石岩透镜体(p,q;局部为辉石岩,o)被英云闪长质脉体侵入(n)(尚义五十家);(r,s)-变玄武安山岩(角闪斜长片麻岩)显微照片(r为单偏光,s为正交偏光,25倍);(t,u)-变安山岩(角闪黑云斜长片麻岩)显微照片(t为单偏光,u为正交偏光,25倍);(v,w)-变质英安岩显微照片(v为单偏光,w为正交偏光,25倍)

Fig. 3 Photos show geological relationship between Late Archean meta-volcano-sediments and grey gneisses, as well as representative micro-textures of selected samples

(a-c)-meta-pebbly sandstone-sandstone-quartzite-marble sequences (a) and enlarged parts of meta-pebbly sandstone-sandstone (b) and quartzite (c, with minor banded iron formation (BIF)) in the Hongqiyingsi Group (Huangtuyao, Shangyi); (d-f)-meta-volcanic layers, showing interlayer of felsic and mafic layers (d, e) and meta-andesite (f) (Huangtuyao, Shangyi); (g, h)-tonalitic gneisses intruded metamorphosed mafic volcanics (g), with locally sedimentary structures preserved (h) (Huangtuyao, Shangyi); (i-m)-tonalitic gneisses intruded the meta-gabbro slices, the meta-gabbros present as two-pyroxene granulite, amphibolite and minor garnet-bearing two-pyroxene granulite, and the two sides of these meta-gabbro slices show some enclaves, deformed as lenses (j-m), (i) is from Wushijia, Shangyi, (j-l) is from Hongqiying-Nandi, Chongli; and (m) is from Xiaosuanguo, Shangyi; (n, q)-slices of megacrystal gabbro (p, q; locally pyroxenite, o) were intruded by tonalitic veins (n) (Wushijia, Shangyi); (r, s)-microtextures of meta-basaltic andesite (amphibolite plagioclase gneiss) (r, plane polarized light; s, cross polarized light; $\times 25$); (t, u)-microtextures of meta-andesite (amphibolite biotite plagioclase gneiss) (t, plane polarized light; u, cross polarized light; $\times 25$); (v, w)-Microtextures of meta-dacite (v, plane polarized light; w, cross polarized light; $\times 25$)

尚义黄土窑地质剖面长3km(AA',图2a),基本以黄土窑村为界,黄土窑以北为变质火山沉积岩系,火山岩占主体。变质火山岩中,常见变质沉积岩夹层,变质沉积岩的厚度多为<100m,主要岩性组合为变质砾岩(保留砾石)、变质石英砂岩、(含石墨)黑云斜长片麻岩、石英岩和厚层大理岩,见少量BIF夹层(图3a-c)。变质火山岩为中基性-中酸性变质火山岩互层,又以变质中基性火山岩为主(占剖面的2/3到4/5,岩性主要为角闪斜长片麻岩,次为斜长角闪岩),中酸性火山岩(岩性主要为黑云斜长片麻岩,次为角闪黑云斜长片麻岩)层呈条带状与变质中基性火山岩形成互层,变质中酸性火山岩厚度多为几十厘米(图3d-f)。沉积岩段一般出露厚度约40~100m,主要包括大理岩、石英岩、变质石英砂岩和少量火山岩及BIF夹层。这些岩段和变质火山岩系为整合接触,未见构造接触或者岩浆侵入(出)的证据。黄土窑村以南多为英云闪长质片麻岩,其中有少量辉长质岩块,被英云闪长质片麻岩侵入。该部分剖面还有大量花岗岩-花岗伟晶质细脉侵入所有片麻岩单元,这些脉体基本未变形。

尚义五十家地区地质剖面长约2.6km(BB',图2b),主体分布在五十家以北,该剖面最北端为变质火山岩,被英云闪长质片麻岩侵入,在靠近变质火山岩一侧,见很多细的英云闪长质细脉侵入(图3g),在靠近英云闪长质片麻岩一侧,则多见角闪斜长片麻岩和斜长角闪岩透镜体,局部还可以看见变质火山沉积岩岩段团块。这些野外关系明确指示火山沉积岩系的形成早于英云闪长质片麻岩为主的灰色片麻岩。一些大的斜长角闪岩呈厚的条带状,边部有一系列串珠状斜长角闪岩透镜体(图3h,i)。在靠近五十家村附近剖面,见~100m厚的变质巨晶闪长辉长岩-角闪石辉石岩透镜体(板片)(图3n-q)。这些巨晶闪长辉长岩-角闪石辉石岩的辉石

和角闪石常呈自形-半自形,长轴长度达数厘米,斜长石含量变化较大(一般少于30%,表面分布面积百分比),多为他形(图3p,q);少部分为辉石岩(图3o)。

崇礼红旗营-南地地质剖面长约20km(CC',图2c;包括~6km晚古生代-中生代地质体剖面),尚义黄土窑和五十家两个剖面的类似现象在这个剖面均有出露。红旗营-下双台主体为变质火山岩系(角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩、角闪黑云斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩,岩石中局部见石榴石),因基性岩中出现石榴子石,其变质程度为高角闪岩相,变质程度略高于尚义黄土窑地区(低角闪岩相)。见少量变质沉积岩夹层(岩性主要为(含夕线石)(含石墨)(含)石榴子石(角闪)黑云斜长片麻岩和大理岩,黑云母含量较高,达30%)。下双台-南地附近,主体为灰色片麻岩,多见暗色岩片状、条带状、透镜状、“岩墙”状岩性以斜长角闪岩、(石榴)二辉麻粒岩和(巨晶)角闪辉石岩为主的岩块,厚度一般约一米到十几米,边缘多见串珠状暗色透镜体(岩性为斜长角闪岩和(石榴)二辉麻粒岩)(图j-l),指示灰色片麻岩侵入到变质辉长质岩单元之中。

在怀安灰色片麻岩-麻粒岩地体的中心部位,灰色片麻岩中常见条带状、板片状变质辉长岩(岩性多为石榴石二辉麻粒岩和(含石榴石)斜长角闪岩),很多暗色辉长质透镜体常呈零散状、串珠状分布(图3m)。局部也可见一些巨晶闪长辉长岩-角闪石辉石岩透镜体。这些麻粒岩与早元古代高压基性麻粒岩较难区分。主要差别是这些早元古代基性麻粒岩条带边缘多有侵入到英云闪长质片麻岩中的分支,局部见冷凝边,少见串珠状分布于板片状岩体周围的透镜体,原始产状应为岩墙(Peng *et al.*, 2005)。

可见,红旗营-南地地质剖面虽然变质程度较高,但还是

表1 锆石 U-Pb 同位素分析数据表

Table 1 List of U-Pb zircon analyses data

| Spot | U ($\times 10^{-6}$) | Th ($\times 10^{-6}$) | $\frac{\text{Th}}{\text{U}}$ | Pb ($\times 10^{-6}$) | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | $\pm 1\sigma$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | $\pm 1\sigma$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | $\pm 1\sigma$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ 年龄 (Ma) | $\pm 1\sigma$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ 年龄 (Ma) | $\pm 1\sigma$ |
|------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|---|---------------|--|---------------|--|---------------|---|---------------|--|---------------|
| 1 | 141.6 | 134.9 | 1.0 | 254.9 | 0.1680 | 0.0051 | 6.59 | 0.18 | 0.278 | 0.008 | 2538 | 50 | 2058 | 24 |
| 2 | 206.5 | 185.3 | 0.9 | 440.8 | 0.1654 | 0.0028 | 10.58 | 0.17 | 0.454 | 0.010 | 2511 | 28 | 2487 | 15 |
| 3 | 54.5 | 26.6 | 0.5 | 57.4 | 0.1673 | 0.0068 | 7.86 | 0.29 | 0.334 | 0.010 | 2531 | 66 | 2216 | 33 |
| 4 | 107.3 | 57.1 | 0.5 | 202.9 | 0.1666 | 0.0038 | 8.93 | 0.19 | 0.381 | 0.009 | 2524 | 38 | 2331 | 19 |
| 5 | 217.6 | 207.9 | 1.0 | 447.6 | 0.1655 | 0.0029 | 8.85 | 0.15 | 0.381 | 0.009 | 2512 | 29 | 2323 | 15 |
| 6 | 247.3 | 70.5 | 0.3 | 470.3 | 0.1667 | 0.0025 | 9.05 | 0.13 | 0.388 | 0.009 | 2525 | 25 | 2343 | 13 |
| 7 | 22.5 | 19.4 | 0.9 | 41.0 | 0.1676 | 0.0093 | 7.55 | 0.38 | 0.324 | 0.012 | 2534 | 90 | 2179 | 45 |
| 8 | 153.6 | 71.3 | 0.5 | 278.1 | 0.1649 | 0.0031 | 8.34 | 0.15 | 0.365 | 0.009 | 2507 | 31 | 2268 | 16 |
| 9 | 211.9 | 248.5 | 1.2 | 502.2 | 0.1685 | 0.0028 | 11.26 | 0.18 | 0.483 | 0.011 | 2543 | 28 | 2545 | 15 |
| 10 | 84.9 | 34.2 | 0.4 | 161.4 | 0.1660 | 0.0035 | 11.49 | 0.23 | 0.501 | 0.012 | 2518 | 35 | 2564 | 19 |
| 12 | 125.2 | 59.9 | 0.5 | 255.8 | 0.1671 | 0.0043 | 8.40 | 0.20 | 0.365 | 0.010 | 2529 | 42 | 2275 | 21 |
| 13 | 245.7 | 202.9 | 0.8 | 522.3 | 0.1681 | 0.0032 | 9.54 | 0.17 | 0.413 | 0.010 | 2539 | 32 | 2392 | 17 |
| 14 | 306.2 | 341.9 | 1.1 | 703.8 | 0.1661 | 0.0023 | 10.40 | 0.14 | 0.456 | 0.010 | 2518 | 23 | 2471 | 13 |
| 15 | 127.6 | 97.3 | 0.8 | 239.5 | 0.1665 | 0.0026 | 8.68 | 0.13 | 0.380 | 0.009 | 2522 | 26 | 2305 | 14 |
| 16 | 181.1 | 146.0 | 0.8 | 356.6 | 0.1682 | 0.0036 | 9.02 | 0.18 | 0.392 | 0.010 | 2540 | 35 | 2340 | 18 |
| 17 | 215.3 | 171.2 | 0.8 | 375.5 | 0.1682 | 0.0027 | 8.25 | 0.13 | 0.361 | 0.009 | 2540 | 27 | 2259 | 14 |
| 18 | 148.0 | 98.3 | 0.7 | 189.4 | 0.1681 | 0.0037 | 6.27 | 0.13 | 0.275 | 0.007 | 2538 | 36 | 2014 | 18 |
| 19 | 377.2 | 526.4 | 1.4 | 713.7 | 0.1668 | 0.0026 | 8.30 | 0.13 | 0.368 | 0.009 | 2526 | 26 | 2264 | 14 |
| 20 | 136.9 | 72.5 | 0.5 | 255.8 | 0.1671 | 0.0037 | 10.60 | 0.23 | 0.470 | 0.012 | 2528 | 37 | 2489 | 20 |
| 21 | 162.1 | 143.7 | 0.9 | 267.2 | 0.1668 | 0.0039 | 6.67 | 0.14 | 0.296 | 0.008 | 2526 | 38 | 2068 | 19 |
| 22 | 174.3 | 162.8 | 0.9 | 330.7 | 0.1686 | 0.0049 | 9.14 | 0.24 | 0.403 | 0.012 | 2544 | 47 | 2352 | 24 |
| 23 | 142.4 | 63.9 | 0.4 | 225.7 | 0.1673 | 0.0038 | 7.70 | 0.16 | 0.342 | 0.009 | 2531 | 38 | 2197 | 19 |
| 24 | 102.5 | 69.5 | 0.7 | 190.2 | 0.1676 | 0.0043 | 8.55 | 0.21 | 0.380 | 0.010 | 2533 | 42 | 2292 | 22 |
| 25 | 106.3 | 66.3 | 0.6 | 227.7 | 0.1650 | 0.0045 | 10.63 | 0.27 | 0.481 | 0.014 | 2507 | 45 | 2492 | 24 |
| 26 | 85.4 | 58.0 | 0.7 | 188.9 | 0.1681 | 0.0044 | 11.55 | 0.29 | 0.513 | 0.014 | 2539 | 44 | 2568 | 23 |
| 27 | 160.0 | 116.5 | 0.7 | 338.1 | 0.1681 | 0.0033 | 10.55 | 0.20 | 0.473 | 0.012 | 2539 | 33 | 2484 | 18 |
| 28 | 60.4 | 39.3 | 0.7 | 124.5 | 0.1684 | 0.0057 | 10.32 | 0.33 | 0.463 | 0.014 | 2542 | 56 | 2464 | 29 |
| 29 | 386.0 | 279.3 | 0.7 | 752.9 | 0.1673 | 0.0033 | 9.07 | 0.17 | 0.410 | 0.010 | 2531 | 32 | 2345 | 17 |
| 30 | 79.3 | 55.9 | 0.7 | 138.7 | 0.1671 | 0.0043 | 8.48 | 0.21 | 0.384 | 0.011 | 2529 | 43 | 2283 | 22 |
| 31 | 81.6 | 59.6 | 0.7 | 170.0 | 0.1665 | 0.0047 | 9.75 | 0.26 | 0.444 | 0.013 | 2522 | 46 | 2412 | 24 |
| 33 | 171.8 | 134.6 | 0.8 | 349.7 | 0.1683 | 0.0037 | 10.37 | 0.22 | 0.469 | 0.013 | 2541 | 36 | 2469 | 20 |
| 34 | 154.7 | 126.5 | 0.8 | 228.4 | 0.1676 | 0.0036 | 7.95 | 0.17 | 0.362 | 0.010 | 2533 | 36 | 2226 | 19 |
| 35 | 434.7 | 267.1 | 0.6 | 752.5 | 0.1675 | 0.0044 | 7.81 | 0.19 | 0.356 | 0.010 | 2533 | 44 | 2210 | 22 |
| 36 | 167.1 | 147.6 | 0.9 | 340.5 | 0.1653 | 0.0040 | 10.24 | 0.24 | 0.473 | 0.013 | 2511 | 40 | 2457 | 21 |

能够识别出与尚义地区一致的地质现象,即1)红旗营子群火山沉积岩系被灰色片麻岩侵入;2)灰色片麻岩中均可见一些早期辉长质岩片,以及一些红旗营子群火山沉积岩系岩段残片;3)灰色片麻岩中均可见一些超镁铁质岩石(主要为巨晶辉石岩)。

从黄土窑剖面变质火山岩中的主体变质中基性火山岩和次要的中酸性火山岩选取了代表性样品,取样位置位于图2a剖面中段。变玄武安山岩样品(样品号08HTY01,02)镁铁质矿物主要为角闪石(20%~30%,薄片显微镜下的面积分布,下同)和极少量黑云母,长英质矿物以斜长石为主(60%),见少量正长石和石英(图3r,s),定名为角闪斜长片麻岩。变质安山岩样品(样品号08HTY03)主要矿物组成为

角闪石(20%)、黑云母(10%)、斜长石(40%)、正长石(10%)、石英(15%)(图3t,u),定名为黑云角闪斜长片麻岩。变质流纹岩样品(样品号08HTY04)主要矿物组成为斜长石(40%~50%)、正长石(10%)、石英(30%~40%)、黑云母(5%)(图3v,w),定名为(黑云)斜长片麻岩。

4 分析方法

采用重力分选方法从一件约5kg的变玄武安山岩样品(08HTY01,角闪斜长片麻岩)中分选出了大量锆石。这些锆石被固定在环氧树脂靶上。锆石U-Pb和Lu-Hf同位素以及微量元素原位分析通过激光剥蚀电感耦合等离子质谱议

表2 锆石原位 Lu-Hf 同位素分析数据

Table 2 In-situ Lu-Hf analyses data of zircons

| Spot | Lu ($\times 10^{-6}$) | Hf (wt%) | $\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}$ | 2σ | $\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$ | 2σ | $\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}_i}$ | 年龄 (Ma) | $\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ | t_{DM} (Ma) | $f_{\text{Lu/Hf}}$ |
|------|----------------------------|-------------|---|-----------|---|-----------|---|------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------|
| 1 | 70.1 | 1.01 | 0.001234 | 0.000043 | 0.281369 | 0.000023 | 0.281309 | 2538 | -49.6 | 5.2 | 2648 | -0.96 |
| 2 | 81.1 | 0.86 | 0.001303 | 0.000016 | 0.281394 | 0.000022 | 0.281331 | 2511 | -48.7 | 5.4 | 2618 | -0.96 |
| 3 | 24.0 | 1.09 | 0.000387 | 0.000003 | 0.281461 | 0.000021 | 0.281442 | 2531 | -46.4 | 9.8 | 2466 | -0.99 |
| 4 | 34.2 | 1.22 | 0.000344 | 0.000008 | 0.281306 | 0.000018 | 0.281290 | 2524 | -51.8 | 4.2 | 2671 | -0.99 |
| 5 | 55.4 | 1.08 | 0.000827 | 0.000015 | 0.281349 | 0.000019 | 0.281310 | 2512 | -50.3 | 4.6 | 2646 | -0.98 |
| 6 | 37.0 | 1.29 | 0.000450 | 0.000003 | 0.281314 | 0.000016 | 0.281293 | 2525 | -51.6 | 4.3 | 2668 | -0.99 |
| 7 | 24.4 | 0.76 | 0.000436 | 0.000002 | 0.281347 | 0.000018 | 0.281326 | 2534 | -50.4 | 5.7 | 2622 | -0.99 |
| 8 | 30.6 | 1.09 | 0.000409 | 0.000003 | 0.281358 | 0.000017 | 0.281338 | 2507 | -50.0 | 5.5 | 2606 | -0.99 |
| 9 | 97.8 | 0.93 | 0.001489 | 0.000015 | 0.281392 | 0.000022 | 0.281320 | 2543 | -48.8 | 5.7 | 2633 | -0.96 |
| 10 | 27.5 | 1.14 | 0.000204 | 0.000004 | 0.281266 | 0.000016 | 0.281256 | 2518 | -53.3 | 2.8 | 2715 | -0.99 |
| 12 | 32.0 | 0.93 | 0.000516 | 0.000002 | 0.281333 | 0.000018 | 0.281308 | 2529 | -50.9 | 5.0 | 2647 | -0.98 |
| 13 | 47.2 | 0.86 | 0.000692 | 0.000001 | 0.281332 | 0.000020 | 0.281299 | 2539 | -50.9 | 4.9 | 2660 | -0.98 |
| 14 | 86.1 | 0.80 | 0.001560 | 0.000004 | 0.281383 | 0.000021 | 0.281308 | 2518 | -49.1 | 4.7 | 2651 | -0.95 |
| 15 | 63.9 | 0.78 | 0.000881 | 0.000029 | 0.281306 | 0.000021 | 0.281264 | 2522 | -51.8 | 3.2 | 2709 | -0.97 |
| 16 | 78.1 | 0.73 | 0.001358 | 0.000021 | 0.281349 | 0.000022 | 0.281283 | 2540 | -50.3 | 4.3 | 2683 | -0.96 |
| 17 | 54.0 | 1.03 | 0.000707 | 0.000024 | 0.281370 | 0.000020 | 0.281335 | 2540 | -49.6 | 6.2 | 2610 | -0.98 |
| 18 | 38.5 | 0.93 | 0.000567 | 0.000007 | 0.281431 | 0.000019 | 0.281404 | 2538 | -47.4 | 8.6 | 2518 | -0.98 |
| 19 | 62.9 | 1.05 | 0.000701 | 0.000020 | 0.281298 | 0.000016 | 0.281264 | 2526 | -52.1 | 3.3 | 2707 | -0.98 |
| 20 | 25.3 | 1.11 | 0.000352 | 0.000002 | 0.281342 | 0.000017 | 0.281325 | 2528 | -50.6 | 5.6 | 2623 | -0.99 |
| 21 | 71.1 | 0.83 | 0.001265 | 0.000009 | 0.281405 | 0.000020 | 0.281344 | 2526 | -48.3 | 6.2 | 2600 | -0.96 |
| 22 | 88.7 | 0.81 | 0.001662 | 0.000004 | 0.281362 | 0.000023 | 0.281281 | 2544 | -49.9 | 4.3 | 2688 | -0.95 |
| 23 | 30.7 | 1.14 | 0.000362 | 0.000001 | 0.281318 | 0.000017 | 0.281300 | 2531 | -51.4 | 4.7 | 2657 | -0.99 |
| 24 | 32.0 | 0.87 | 0.000473 | 0.000008 | 0.281364 | 0.000020 | 0.281342 | 2533 | -49.8 | 6.3 | 2602 | -0.99 |
| 25 | 34.3 | 0.90 | 0.000545 | 0.000003 | 0.281343 | 0.000021 | 0.281317 | 2507 | -50.5 | 4.8 | 2636 | -0.98 |
| 26 | 34.7 | 0.95 | 0.000454 | 0.000002 | 0.281306 | 0.000018 | 0.281284 | 2539 | -51.8 | 4.4 | 2678 | -0.99 |
| 27 | 57.0 | 0.86 | 0.000741 | 0.000008 | 0.281326 | 0.000019 | 0.281290 | 2539 | -51.1 | 4.5 | 2672 | -0.98 |
| 28 | 26.3 | 0.85 | 0.000450 | 0.000001 | 0.281324 | 0.000022 | 0.281302 | 2542 | -51.2 | 5.0 | 2654 | -0.99 |
| 29 | 45.5 | 1.05 | 0.000547 | 0.000008 | 0.281291 | 0.000018 | 0.281264 | 2531 | -52.4 | 3.5 | 2706 | -0.98 |
| 30 | 26.9 | 0.86 | 0.000437 | 0.000002 | 0.281338 | 0.000022 | 0.281317 | 2529 | -50.7 | 5.3 | 2635 | -0.99 |
| 31 | 36.7 | 1.22 | 0.000481 | 0.000005 | 0.281345 | 0.000018 | 0.281322 | 2522 | -50.5 | 5.3 | 2628 | -0.99 |
| 33 | 70.8 | 0.77 | 0.001310 | 0.000002 | 0.281358 | 0.000023 | 0.281294 | 2541 | -50.0 | 4.7 | 2668 | -0.96 |
| 34 | 49.6 | 1.00 | 0.000873 | 0.000006 | 0.281350 | 0.000018 | 0.281308 | 2533 | -50.3 | 5.1 | 2648 | -0.97 |
| 35 | 82.7 | 1.56 | 0.000701 | 0.000002 | 0.281369 | 0.000016 | 0.281335 | 2533 | -49.6 | 6.0 | 2610 | -0.98 |
| 36 | 47.2 | 1.00 | 0.000769 | 0.000012 | 0.281286 | 0.000016 | 0.281249 | 2511 | -52.5 | 2.4 | 2728 | -0.98 |

注: $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 10000 \times \left\{ \left[\left(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{样品}} - \left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{样品}} \times (e^{\lambda t} - 1) \right] / \left[\left(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR}} - \left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1) \right] - 1 \right\}$; $t_{\text{DM}} = 1 / \lambda \times \ln \left\{ 1 + \left[\left(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{样品}} - \left(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM}} \right] / \left[\left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{样品}} - \left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM}} \right] \right\}$; $f_{\text{Lu/Hf}} = \left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{样品}} / \left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR}} - 1$; 球粒陨石 (CHUR) 和亏损地幔 (DM) 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 现今值分别为 0.282772 和 0.0332 以及 0.28325 和 0.0384 (Blichert-Toft and Albarède, 1997; Griffin *et al.*, 2000); $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Söderlund *et al.*, 2004); t 为表 1 中对应点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值

(LA-MC-ICPMS) 进行测量, 激光器为 193nm 的 GeoLas 型仪器, 本次剥蚀直径约为 63 μm , 质谱仪采用 Neptune MC-ICPMS 和 Agilent 7500a Q-ICPMS 联机分别测试同位素和微量元素。采用 91500 标准锆石作为外标标准物质进行数据处理。激光原位锆石 U-Pb 年龄数据处理和 Hf 同位素校正方法同 Wu *et al.* (2006)。

微量元素含量分析使用 X 荧光光谱法 (XRF), 测试所用仪器型号为 Shimadzu XRF-1700/1500, 标样为 GBW07101-07114 (玄武岩), 分析结果在误差范围内优于 0.2%。烧失量 (或灼烧减量) 设定为粉末样品在 1000°C 下灼烧 1h 后的

质量减少。微量元素含量通过 ELEMENT 型电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS) 测定, 使用 $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ 混合酸溶解样品, 测试的准确性和重现性通过标准样品 GSR1, GSR2 和 GSR3 检验, 分析误差在检出限之上优于 5%。Sr-Nd 同位素分析在 Finnigan MAT 262 型质谱仪上完成, 测定偏差使用 NBS987 (Sr 标准) 和 Ames (Nd 标准) 参考物质监测。Sr 和 Nd 同位素测定的流程背景值分别优于 100pg 和 50pg。 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值的外部精度都优于 0.5% (2σ)。

以上实验, 均完成于岩石圈演化国家重点实验室。

表3 代表性变质火山岩主量 (wt%) 和微量 ($\times 10^{-6}$) 元素含量Table 3 Major (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) data for selective meta-volcanic samples

| Sample | 08HTY01 | 08HTY02 | 08HTY03 | 08HTY04 |
|--------------------------------|---------|---------|-----------|---------|
| 岩性 | 角闪斜长片麻岩 | 角闪斜长片麻岩 | 黑云角闪斜长片麻岩 | 斜长片麻岩 |
| SiO ₂ | 54.78 | 54.70 | 59.38 | 70.46 |
| TiO ₂ | 0.77 | 0.80 | 0.81 | 0.24 |
| Al ₂ O ₃ | 15.58 | 15.10 | 15.47 | 15.98 |
| FeO ^T | 8.9 | 9.0 | 7.5 | 1.8 |
| MnO | 0.15 | 0.15 | 0.11 | 0.02 |
| MgO | 4.54 | 5.13 | 2.99 | 0.86 |
| CaO | 7.14 | 6.61 | 5.18 | 2.64 |
| Na ₂ O | 4.42 | 4.19 | 4.28 | 5.06 |
| K ₂ O | 1.99 | 2.86 | 2.94 | 1.71 |
| P ₂ O ₅ | 0.55 | 0.45 | 0.38 | 0.08 |
| LOI | 0.64 | 0.56 | 0.44 | 0.66 |
| TOTAL | 99.4 | 99.6 | 99.4 | 99.5 |
| Rb | 37.1 | 47.1 | 62.7 | 44.9 |
| Sr | 1700 | 1170 | 1166 | 745 |
| Ba | 862 | 1111 | 1358 | 828 |
| Th | 0.24 | 0.14 | 0.43 | 0.22 |
| U | 0.15 | 0.10 | 0.16 | 0.13 |
| Pb | 9.11 | 10.1 | 13.9 | 10.8 |
| Zr | 178 | 128 | 286 | 96.8 |
| Hf | 4.10 | 3.23 | 7.06 | 2.38 |
| Nb | 4.73 | 4.50 | 5.41 | 1.64 |
| Ta | 0.20 | 0.19 | 0.18 | 0.09 |
| Sc | 19.6 | 22.7 | 15.9 | 1.17 |
| V | 169 | 206 | 180 | 32.8 |
| Cr | 148 | 172 | 95.5 | 15.7 |
| Co | 25.1 | 25.9 | 19.1 | 5.63 |
| Ni | 44.6 | 45.1 | 41.0 | 9.87 |
| Cu | 8.54 | 13.7 | 10.8 | 10.1 |
| Be | 1.71 | 1.29 | 1.28 | 1.13 |
| Ga | 21.9 | 21.2 | 22.4 | 16.4 |
| Cs | 0.35 | 0.61 | 0.39 | 0.65 |
| Bi | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.02 |
| Li | 21.6 | 24.2 | 16.7 | 27.3 |
| La | 53.8 | 32.6 | 32.9 | 21.2 |
| Ce | 112 | 75.9 | 71.9 | 31.1 |
| Pr | 13.8 | 10.2 | 9.96 | 2.94 |
| Nd | 54.4 | 40.7 | 40.8 | 9.26 |
| Sm | 9.30 | 7.56 | 7.00 | 1.06 |
| Eu | 2.55 | 1.91 | 1.77 | 0.76 |
| Gd | 7.15 | 6.16 | 5.66 | 0.81 |
| Tb | 0.87 | 0.77 | 0.74 | 0.09 |
| Dy | 4.44 | 4.00 | 3.88 | 0.39 |
| Ho | 0.79 | 0.75 | 0.73 | 0.06 |
| Er | 2.03 | 1.91 | 1.86 | 0.15 |
| Tm | 0.28 | 0.29 | 0.27 | 0.02 |
| Yb | 1.82 | 1.79 | 1.62 | 0.13 |
| Lu | 0.27 | 0.26 | 0.24 | 0.02 |
| Y | 20.5 | 19.2 | 18.6 | 2.55 |

表4 代表性变质火山岩样品 Nd-Sr 同位素数据

Table 4 Nd-Sr isotope data for selective meta-volcanic samples

| Sample | 08HTY01 | 08HTY02 | 08HTY03 | 08HTY04 |
|---|----------|----------|----------|----------|
| Rb ($\times 10^{-6}$) | 34.9 | 45.7 | 59.2 | 43.0 |
| Sr ($\times 10^{-6}$) | 1617 | 1138 | 1121 | 722.4 |
| ⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr | 0.0625 | 0.1164 | 0.1530 | 0.1724 |
| ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr | 0.706243 | 0.708101 | 0.710899 | 0.706746 |
| 2 σ | 0.000011 | 0.000011 | 0.000012 | 0.000011 |
| ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr _i | 0.70398 | 0.70389 | 0.70537 | 0.70051 |
| 2 σ | 0.00049 | 0.00053 | 0.00057 | 0.00058 |
| Sm ($\times 10^{-6}$) | 8.62 | 7.25 | 6.68 | 1.07 |
| Nd ($\times 10^{-6}$) | 50.7 | 39.7 | 36.9 | 9.7 |
| ¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd | 0.1029 | 0.1105 | 0.1097 | 0.0668 |
| ¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd | 0.511244 | 0.511341 | 0.511267 | 0.510852 |
| 2 σ | 0.000012 | 0.000011 | 0.000014 | 0.000013 |
| $\epsilon_{Nd}(t)$ | 3.0 | 2.4 | 1.2 | 7.0 |
| 2 σ | 1.7 | 1.8 | 1.8 | 1.1 |
| $t_{DM}(Ga)$ | 2.61 | 2.66 | 2.74 | 2.37 |
| $f_{Sm/Nd}$ | -0.48 | -0.44 | -0.44 | -0.66 |

5 分析结果

分析结果见表1、表2、表3、表4。

5.1 锆石 U-Pb 年龄

变玄武安山岩(08HTY01,角闪斜长片麻岩)样品分选的锆石大都晶形完好、无磨圆,透明、浅褐色、短柱状。晶体长度多为150 μ m左右。阴极发光照片显示这些锆石大多有很薄的亮边(壳),内部呈现很好的环带结构,少数还具有沙钟结构(图4插图a),指示这些锆石很可能是岩浆成因。

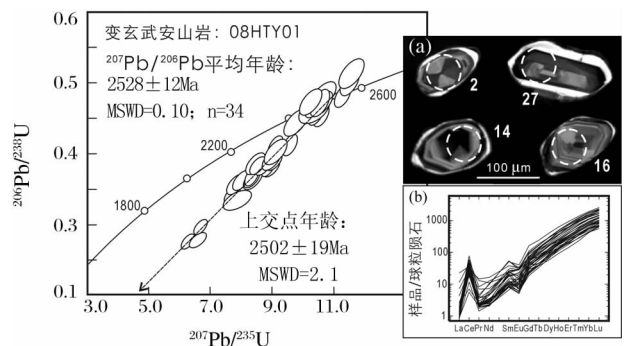


图4 U-Pb 年龄谱和图

插图分别为代表性锆石阴极发光照片(a,数字为分析点号,见表1)和球粒陨石标准化锆石原位稀土元素含量配分型式图(b,球粒陨石标准值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Concordia U-Pb age diagram

Inset figures are selected cathodoluminescence (CL) images (a, numbers are spot serial numbers as those in Table 1) and chondrite-normalized rare earth element patterns (b, chondrite-normalized values after Sun and McDonough, 1989)

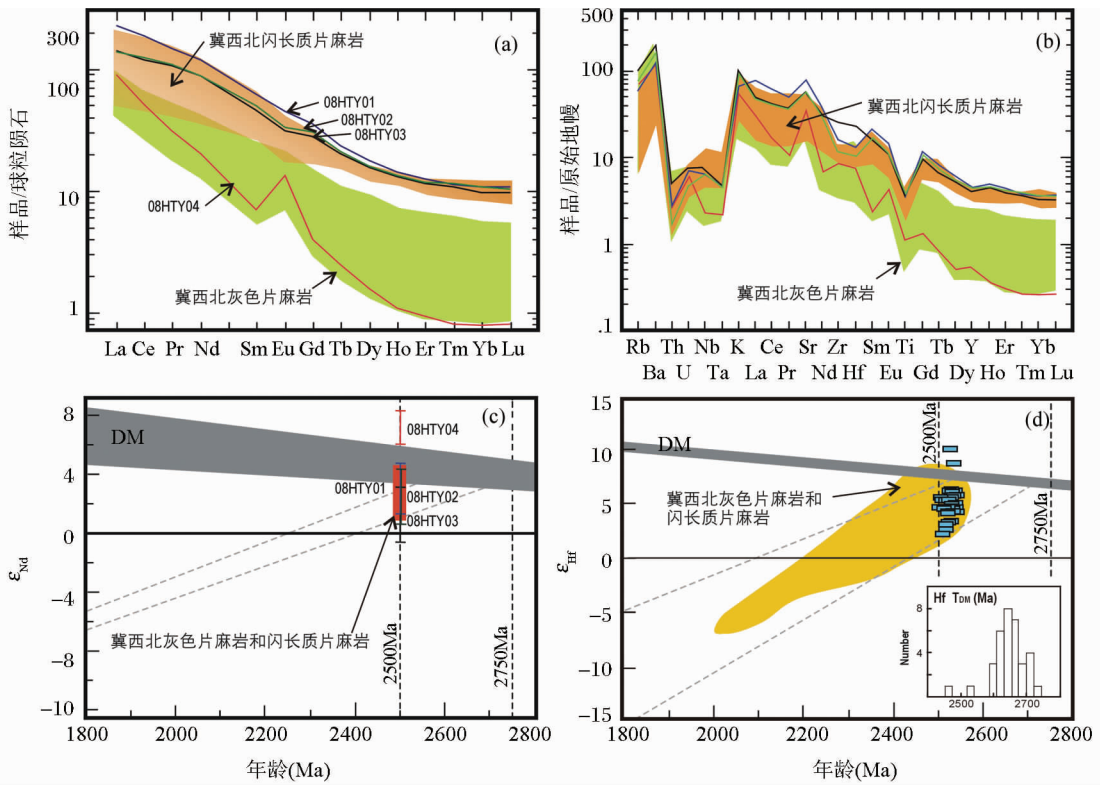


图5 尚义黄土窑-五十家地区红旗营子群变质火山岩主量、微量和同位素特征图解

(a)-稀土元素球粒陨石标准化型式图；(b)-微量元素原始地幔标准化型式图；(c)-全岩 ϵ_{Nd} -锆石年龄演化关系图；(d)-锆石 ϵ_{Hf} -年龄演化关系图(样品08HTY01)。冀西北灰色片麻岩(TTG片麻岩)和闪长质片麻岩相关数据均来自刘富等(2009)；球粒陨石和原始地幔标准值据Sun and McDonough (1989)

Fig. 5 Major, trace element and isotope features of meta-volcanics in the Hongqiyingzi Group in Huangtuyao-Wushijia, Shangyi area

(a)-chondrite-normalized rare earth element patterns; (b)-primitive mantle-normalized trace element diagram; (c)- ϵ_{Nd} vs. age diagram; (d)- ϵ_{Hf} vs. age diagram (sample 08HTY01). Data for both grey gneisses (TTG gneisses) and diorite gneisses are from Liu *et al.* (2009). Chondrite and primitive mantle-normalized values are after Sun and McDonough (1989)

本次共分析了34个点,这些分析点全部位于阴极发光较暗的晶域,而对于阴极发光显示的亮边晶域,由于非常窄(图4),没有获得有效数据。锆石的U含量 $22 \times 10^{-6} \sim 437 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为0.24~1.4。单点分析误差较大, 1σ 误差多为1%~2%,但 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化范围较小,从2544Ma到2507Ma。 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2528 \pm 12\text{Ma}$ (2σ , MSWD=0.1, n=34)(图4)。在谐和图上,所有分析点构成了一条比较好的不一致线,其上交点年龄为 $2502 \pm 19\text{Ma}$ (2σ , MSWD=2.1),与加权平均年龄基本一致。下交点指向原点,反映Pb丢失主要发生在现代。由于绝大部分锆石具有良好的岩浆环带,稀土元素含量显示岩浆锆石特征(图4插图b),而岩石经历的变质级别较低,我们认为,~2528Ma的年龄代表了变玄武安山岩的形成年龄。

另外,锆石原位分析 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为0.00020~0.00166, $\epsilon_{Hf}(t)$ (t 为各测点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值)为+2.4~+9.8。

5.2 主量、微量和同位素地球化学特征

岩石普遍经历了低角闪岩相变质作用,因此,活动性元素(如K、Na、Rb、Cs等)的含量可能受到了变质作用的影响,但Al、Mg、Ti等主量元素,以及稀土元素和高场强元素一般活动性相对较低,受影响较小(如Middelburg *et al.*, 1988)。

变玄武安山岩-安山岩样品的 SiO_2 含量54.7%~59.4%, MgO含量3.0%~5.1%, Al_2O_3 含量~15.5%, TiO_2 含量~0.8%,样品高Na低K, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量~7.0%(表3)。岩石富集稀土元素,轻稀土相对重稀土强烈富集, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 13 \sim 21$ (图5a)。在原始地幔标准化蛛网图上,样品亏损大部分高场强元素(如, Th、U、Nb、Ta、Ti),富集大部分大离子亲石元素(如, Ba、Sr、La、Ce)(图5b)。 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 变化较大(0.0625~0.1530),但是 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ 变化较小,为0.7039~0.7054(表4)。这说明Sr同位素很可能保留了原岩的特征。 $^{87}\text{Sm}/^{86}\text{Nd}$ 为0.1029~0.1105, $\epsilon_{Nd}(t)$ ($t=2500\text{Ma}$)为1.2

~3.0,变化均较小(表4)。

变流纹岩样品 MgO 含量 ~0.9%, Al₂O₃ 含量 ~15.5%, TiO₂ 含量 ~0.2%, 高 Na 低 K, Na₂O + K₂O 含量 ~7.0% (表3)。岩石富集稀土元素,轻稀土相对重稀土强烈富集, (La/Yb)_N = 122 (图5a)。在原始地幔标准化蛛网图上,样品与玄武安山岩-安山岩相似,亏损大部分高场强元素(如, Th、U、Nb、Ta、Ti),富集大部分大离子亲石元素(如, Ba、Sr、La、Ce) (图5b)。该样品的 ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 为 0.1724, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_t 为 0.7005; ⁸⁷Sm/⁸⁶Nd 为 0.0668, ε_{Nd}(t) (t = 2500Ma) 为 +7 (表4)。这些同位素比值明显不同于变玄武安山岩-安山岩样品, ε_{Nd}(t) (t = 2500Ma) 值甚至高于亏损地幔值(图5c)。这表明,这些同位素比值可能受到了变质作用等后期过程的影响,不能反映母岩浆成分特征。

6 讨论

6.1 火山-沉积岩系的时代及其与灰色片麻岩的关系

从锆石 U-Pb 年龄来看,本文所获得的尚义黄土窑-五十家地区红旗营子群变质火山岩的形成时代和其他作者获得的相关火山岩年龄接近(如,刘树文等,2007),也和本区(中国地质大学(北京),1994; Wang *et al.*, 2009)及冀西北其它地区(Zhao *et al.*, 2008; 刘富等,2009; 刘树文等,2011; Liu *et al.*, 2012)灰色片麻岩的形成时代一致,都是约 2520Ma。然而,从地质关系来看,冀西北地区相关地质剖面(图2a-c)中灰色片麻岩无一例外侵入到了红旗营子群火山-沉积岩系之中。即,灰色片麻岩的就位紧随火山-沉积岩系的形成。

本区灰色片麻岩-麻粒岩地体岩石局部记录的变质作用高达高压麻粒岩相,这些高级变质作用发生在早元古代晚期(Guo *et al.*, 2005 及所引文献)。然而,这些岩石可能在晚太古代也经历了变质,只是由于早元古代晚期麻粒岩相变质作用叠加,使得更早期的变质年龄信息难于保存。邻区冀东地区晚太古代含条带状铁建造变质火山沉积岩系给出了 ~2510Ma 的变质年龄(Zhang *et al.*, 2012; Nutman *et al.*, 2011)。而尚义地区红旗营子群变质火山沉积岩系变质程度较低,没有给出可靠的变质年龄。虽然不能确认本区晚太古代末期(~2510Ma)是否经历了不同程度的变质作用,从而导致不同单元的地壳深度发生过相对变化。但是作为区域上仅有的两个晚太古代地质单元,灰色片麻岩地体是深成侵入体,位于上地壳下部到中下地壳,红旗营子群火山沉积岩系形成于地壳表层,它们二者在形成时(25亿年前)在地壳结构中的相对位置无疑是确定的,其形成时的相互关系可以反映当时的地壳结构。

本文获得了少量尚义地区红旗营子群火山岩系样品的地球化学数据,这些数据和地质资料中相关数据(中国地质大学(北京),1994)基本一致。将这些数据和刘富等(2009)所报道的灰色片麻岩-麻粒岩地体数据对比,无论元素特征还是同位素特征,中基性和酸性火山岩分别和闪长质侵入岩

及灰色片麻岩相似(图5a-c)。灰色片麻岩及其中的闪长质片麻岩的形成时代稍晚于红旗营子群火山岩系,但是它们形成于同一地区。因此,火山沉积岩系和深成片麻岩或者有相似(同)的母岩浆,并且经历相似的分异过程;或者火山岩系作为灰色片麻岩和闪长质片麻岩的原岩的主要组成部分。我们初步认为后者可能性较小,因为如果是火山岩系发生高程度部分熔融,成分和原岩会有较大区别,同时可能会形成单一的母岩浆,难于分异成灰色片麻岩和闪长质侵入岩。而且,火山沉积岩系中的一些沉积岩,包括大理岩和石英岩等,势必大大影响母岩浆成分,从而形成与灰色片麻岩和闪长质片麻岩成分不同的岩石。而全岩 Nd 同位素和锆石原位 Hf 同位素分析表明(图5c-d),火山岩系与灰色片麻岩或者闪长质片麻岩一样(刘富等,2009; Liu *et al.*, 2012),它们均来源于新生地壳的再造,并可能有年轻的地幔源区物质的加入。

6.2 冀西北地区晚太古代大陆地壳剖面及其可能形成过程

图6是根据冀西北地区晚太古代火山沉积岩系(红旗营子群)和灰色片麻岩-麻粒岩地体(灰色片麻岩及其中的变质火山沉积岩岩片、变质辉长质条带、角闪辉石岩-巨晶闪长辉长岩透镜体以及稍晚的闪长质-花岗质侵入体等)的地质关系所恢复的该地区晚太古代大陆地壳剖面图。该图只是示意性的给出了地壳结构模型中岩石单元的关系,没有对深度或者厚度进行有效限定。我们初步认为,灰色片麻岩地体中存在的大量板片状、“岩墙”状、透镜体状变质辉长质岩石以及火山沉积岩岩片一部分可能是红旗营子群变质火山岩系构成的捕掳体,一部分可能是火山沉积岩系形成之前的地壳残片组成的捕掳体,还有一部分则可能是火山岩系根部或者岩浆房的残留体。这些不同来源不易通过成分或者组成进行区分。灰色片麻岩中分布的少量的角闪石辉石岩-巨晶闪长辉长岩的成因也存在多种可能,如,它们是火山岩系岩

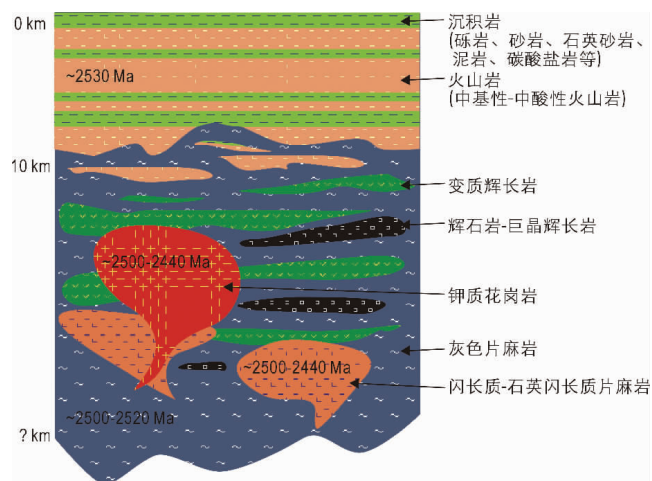


图6 冀西北地区晚太古代大陆地壳剖面假想图

Fig. 6 Hypothesized Late Archean continental crust section in Northwest Hebei area

浆房里的堆晶体;或者它们是灰色片麻岩/闪长质侵入体母岩浆早期分异形成的堆晶体,这两者可能由于火山岩系和灰色片麻岩/闪长质侵入岩母岩浆成分近似而难以通过成分对比进行区分。然而,火山岩系根部岩浆房堆晶体可能更容易解释所看到的野外关系,这是因为:1)这些透镜体被英云闪长质片麻岩平直侵入;2)它们多接近变质火山沉积岩系地层,如果是灰色片麻岩/闪长质岩体岩浆堆晶体,它们更应该位于更深的地壳层次。然而,Wang *et al.* (2009)对灰色片麻岩中部分镁铁质、超镁铁质岩石进行化学分析后认为,这些岩片原岩为富 Nb 玄武岩,属于晚太古代洋壳残片。

本区的地壳结构特征与 Windley and Garde (2009) 描述的格陵兰地区的地壳结构比较相似,如,1)主体都由较低级变质的火山沉积岩系和较高级变质的灰色片麻岩-麻粒岩体组成;2)灰色片麻岩/闪长质片麻岩侵入到变质火山沉积岩系之中,其形成时代稍晚;3)灰色片麻岩-麻粒岩地体中有大量变质火山沉积岩岩片、变质辉长岩岩片、辉石岩-辉长岩堆晶体残片等。

华北克拉通晚太古代出露区普遍出现以灰色片麻岩-麻粒岩地体和以角闪岩相变质火山沉积岩系为主的地质单元(沈其韩等,1992;赵宗溥等,1993;沈保丰等,1994;白瑾等,1996;伍家善等,1998),理解二者的关系对认识华北克拉通晚太古代地质演化非常重要。这些地质单元可以提供晚太古代陆壳的组成与结构的重要信息(Bleeker, 2002; Windley and Garde, 2009),并为认识早期陆壳形成的大陆动力学机制提供依据。无论是板块构造和地幔柱构造两种或者某一种模式(Ayer *et al.*, 2002; Dirks *et al.*, 2002; Percival *et al.*, 2004; Bédard, 2006; Witze, 2006; van Kranendonk *et al.*, 2007; Labrosse and Jaupart, 2007; Zhao, 2007; Windley and Garde, 2009; Wyman, 2012),还是其它模式(Hamilton, 2007, 2011),都需要考虑这些地质单元所组成的大陆地壳的结构和岩石形成过程。Windley and Garde (2009)和 Szilas *et al.* (2012)结合现代岛弧的形成过程来探讨格陵兰地区相似的地壳结构的形成是一个可以借鉴的思路,该思路把类似地壳结构的形成归纳为四个阶段:1)火山岩系喷出地表,火山岩岩浆房中的辉长岩-辉石岩-辉长岩堆晶体就位于古老地壳中;2)灰色片麻岩(TTG)侵入到上地壳,并且就位到中下地壳层次;3)灰色片麻岩和火山沉积岩系二元地壳结构形成之后,钾质花岗岩等的侵入标志着地壳趋向成熟和稳定;4)不同岛弧/地块发生拼贴,形成晚太古代陆壳。其中,阶段1)和2)可以和现代岛弧形成过程类比。

由于研究区相关地质单元及其地质关系与格陵兰地区有一定的可对比性,本地区有可能也经历了相似的过程。检验这一陆壳形成模式,或者发展新的模式,除了需要获得很多类似冀西北地区的二维地壳结构信息,更为重要的是需要恢复三维地壳结构,并识别主要地质单元在时间和物质演化上的关系。对华北克拉通而言,需要厘定相关岩石单元在空

间上的延续性及在时间和物质演化等方面的继承关系。

7 结论

(1)冀西北尚义黄土窑-五十家地区红旗营子群变质火山岩系一个变质玄武-安山岩样品(角闪斜长片麻岩)给出了~2530Ma的锆石年龄,这一年龄可能指示了该火山岩的形成时代,代表相关火山沉积事件发生在晚太古代。

(2)野外地质关系指示冀西北尚义-崇礼地区红旗营子群的形成早于灰色片麻岩及其中的闪长质侵入体;对比研究表明,红旗营子群中的火山岩系的不同成分端元和灰色片麻岩及闪长质片麻岩可以分别进行对比,指示这些岩石可能具有相似的成因。

(3)根据冀西北地区相关岩石单元的地质关系,初步重建了该地区晚太古代火山沉积岩系和灰色片麻岩构成的二维大陆地壳结构。

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所李禾、靳新娣、杨岳衡、李潮峰高工和张艳斌副研究员、李向辉博士在数据测试和分析方面的帮助;感谢翟明国研究员、郭敬辉研究员、张连昌研究员、万渝生研究员等的指导和帮助。

References

- Allmendinger RW, Nelson KD, Potter CJ, Barazangi M, Brown LD and Oliver JE. 1987. Deep seismic reflection characteristics of the continental crust. *Geology*, 15(4): 304–310
- Ayer J, Amelin Y, Corfu F, Kamo S, Ketchum J, Kwok K and Trowell N. 2002. Evolution of the southern Abitibi greenstone belt based on U-Pb geochronology: Autochthonous volcanic construction followed by plutonism, regional deformation and sedimentation. *Precambrian Research*, 115(1–4): 63–95
- Bai J, Huang XG, Dai FY and Wu CH. 1996. *The Precambrian Evolution of China*. 2nd Edition. Beijing: Geological Publishing House, 1–228 (in Chinese)
- Bédard JH. 2006. A catalytic delamination-driven model for coupled genesis of Archean crust and sub-continental lithospheric mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(5): 1188–1214
- Bleeker W. 2002. Archean tectonics; A review, with illustrations from the Slave craton. In: Fowler CMR, Ebinger CJ and Hawkesworth CJ (eds.). *The Early Earth: Physical, Chemical and Biological Developments*. Geological Society of London Special Publication, Brassmill Enterprises, Bath, UK, 199: 151–181
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1–2): 243–258
- Dirks PHGM, Zhang JS and Passchier CW. 1997. Exhumation of high-pressure granulites and the role of lower crustal advection in the North China Craton near Datong. *Journal of Structural Geology*, 19(10): 1343–1358
- Dirks PHGM, Jelsma HA and Hofmann A. 2002. Thrust-related accretion of an Archean greenstone belt in the Midlands of Zimbabwe. *Journal of Structural Geology*, 24(11): 1707–1727
- Geng YS and Liu DY. 1997. Petrology, geochemistry and isochronology

- of charnockites in Mashikou area, northwestern Hebei. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16(1): 1–9 (in Chinese with English abstract)
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, van Achterbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133–147
- Guo JH, Zhai MG, Zhang YG, Li YG, Yan YH and Zhang WH. 1993. Early Precambrian Manjinggou high-pressure granulite mélange belt on the south 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)
- Guo JH, Sun M, Chen FK and Zhai MG. 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
- Hamilton WB. 2007. Earth's first two billion years: The era of internally mobile crust. *Geological Society of America Memoirs*, 200: 233–296
- Hamilton WB. 2011. Plate tectonics began in Neoproterozoic time, and plumes from deep mantle have never operated. *Lithos*, 123(1–4): 1–20
- Labrosse S and Jaupart C. 2007. Thermal evolution of the Earth: Secular changes and fluctuations of plate characteristics. *Earth and Planetary Science Letters*, 260(3–4): 465–481
- Li JH, Qian XL, Huang XN and Liu SW. 2000. Tectonic framework of North China block and its cratonization in the Early Precambrian. *Acta Petrologica Sinica*, 16(1): 1–10 (in Chinese with English abstract)
- Liu F, Guo JH, Lu XP and Diwu CR. 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
- Liu F, Guo JH, Peng P and Qian Q. 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
- Liu SW, Lv YJ, Feng YG, Liu XM, Yan QR, Zhang C and Tian W. 2007. Zircon and monazite geochronology of the Hongqiyingzi complex, northern Hebei, China. *Geological Bulletin of China*, 26(9): 1086–1100 (in Chinese with English abstract)
- Liu SW, Lv YJ, Wang W, Yang PT, Bai X and Feng YG. 2011. Petrogenesis of the Neoproterozoic granitoid gneisses in northern Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 909–921 (in Chinese with English abstract)
- Middelburg JJ, van der Weijden CH and Woitiez JRW. 1988. Chemical processes affecting the mobility of major, minor and trace elements during weathering of granitic rocks. *Chemical Geology*, 68(3–4): 253–273
- Nutman AP, Wan YS, Du LL, Friend CRL, Dong CY, Xie HQ, Wang W, Sun HY and Liu DY. 2011. Multistage Late Neoproterozoic crustal evolution of the North China Craton, eastern Hebei. *Precambrian Research*, 189(1–2): 43–65
- Peng P, Zhai MG, Zhang HF and Guo JH. 2005. Geochronological constraints on the Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: SHRIMP zircon ages of different types of mafic dikes. *International Geology Review*, 47(5): 492–508
- Peng P, Guo JH, Windley BF and Li X. 2011. Halaqin volcano-sedimentary succession in the central-northern margin of the North China Craton: Products of Late Paleoproterozoic ridge subduction. *Precambrian Research*, 187(1–2): 165–180
- Peng P, Guo JH, Zhai MG, Windley BF, Li TS and Liu F. 2012. Genesis of the Hengling magmatic belt in the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonics. *Lithos*, 148: 27–44
- Percival JA, Fountain DM and Salisbury MH. 1992. Exposed crustal cross sections as windows on the lower crust. In: Fountain DM, Arculus RJ and Kay RW (eds.). *Continental Lower Crust*. Amsterdam: Elsevier, 317–362
- Percival JA, McNicoll V, Brown JL and Whalen JB. 2004. Convergent margin tectonics, central Wabigoon subprovince, Superior Province, Canada. *Precambrian Research*, 132(3): 213–244
- Rudnick RL. 1992. Xenoliths: Samples of the lower continental crust. In: Fountain DM, Arculus RJ and Kay RW (eds.). *Continental Lower Crust*. Amsterdam: Elsevier, 269–316
- Shen BF, Luo H, Li SB *et al.* 1994. *Geology and Metallization of Archean Greenstone Belts in North China Platform*. Beijing: Geological Publishing House, 1–202 (in Chinese with English abstract)
- Shen QH, Xu HF, Zhang ZQ, Gao JF, Wu JS and Ji CL. 1992. Early Precambrian Granulites in China. Beijing: Geological Publishing House, 1–236 (in Chinese with English abstract)
- Söderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The ¹⁷⁶Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3–4): 311–324
- Stern RJ. 2005. Evidence from ophiolites, blueschists, and ultrahigh-pressure metamorphic terranes that the modern episode of subduction tectonics began in Neoproterozoic time. *Geology*, 33(7): 557–560
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle compositions and processes. In: Saunders AD and Nony MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313–354
- Szilas K, Hoffmann JE, Scherstén A, Rosing MT, Windley BF, Kokfelt TF, Keulen N, van Hinsberg VJ, Næraa T, Frei R and Münker C. 2012. Complex calc-alkaline volcanism recorded in Mesoproterozoic supracrustal belts north of Frederikshåb Isblink, southern West Greenland: Implications for subduction zone processes in the early Earth. *Precambrian Research*, 208–211: 90–123
- van Kranendonk MJ, Hugh Smithies R, Hickman AH and Champion DC. 2007. Review: Secular tectonic evolution of Archean continental crust: Interplay between horizontal and vertical processes in the formation of the Pilbara Craton, Australia. *Terra Nova*, 19(1): 1–38
- Wan YS, Dong CY, Liu DY, Kröner A, Yang CH, Wang W, Du LL, Xie HQ and Ma MZ. 2011. Zircon ages and geochemistry of Late Neoproterozoic syenogranites in the North China Craton: A review. *Precambrian Research*, doi: org/10. 10. 16/j. precamb. 2011. 05. 001
- Wang F, Chen FK, Siebel W, Li SQ, Peng P and Zhai MG. 2011. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition of the Hongqiyingzi Complex, northern Hebei Province: New evidence for Paleoproterozoic and Late Paleozoic evolution of the northern margin of the North China Craton. *Gondwana Research*, 20: 122–136
- Wang RM, Chen ZZ and Lai XY. 1997. Archean geotectonic transition of systems from mantle plume to plate tectonics in North China. *Earth Science*, 22(3): 317–320 (in Chinese with English abstract)
- Wang RM and Dong WD. 1999. A new consideration about geotectonic setting of high-pressure granulite belt in northwestern Hebei Province. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 347–351 (in Chinese with English abstract)
- Wang RM, Wan YS, Cheng SH and Feng YG. 2009. Modern-style subduction processes in the Archean: Evidence from the Shangyi Complex in North China Craton. *Acta Geologica Sinica*, 83(3): 535–543
- Weber MBI, Tarney J, Kempton PD and Kent RW. 2002. Crustal make-up of the northern Andes: Evidence based on deep crustal xenolith

- suites, Mercaderes, SW Columbia. *Tectonophysics*, 345(1-4): 49-82
- Windley BF. 1996. *The Evolving Continents*. 3rd Edition. Chichester, England; John Wiley & Sons, 317-465
- Windley BF and Garde AA. 2009. Arc-generated blocks with crustal sections in the North Atlantic craton of West Greenland; Crustal growth in the Archean with modern analogues. *Earth-Science Reviews*, 93(1-2): 1-30
- Witze A. 2006. Geology: The start of the world as we know it. *Nature*, 442(7099): 128-131
- Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1-2): 105-126
- Wu JS, Geng YS, Shen QH *et al.* 1998. *Archean Geology Characteristics and Tectonic Evolution of Sino-Korea Paleo-Continent*. Beijing: Geological Publication House, 1-104 (in Chinese)
- Wyman DA. 2012. A critical assessment of Neorochean "plume only" geodynamics: Evidence from the Superior province. *Precambrian Research*, doi: org/10.1016/j.precamres.2012.01.010
- Zhai MG, Guo JH, Yan YH, Han XL and Li YG. 1993. The discovery of high-pressure basic granulite Terrain in North China Archean Craton and preliminary study. *Science in China (Series B)*, 36(11): 1402-1408
- Zhai MG, Guo JH, Yan YH, Li YG, Li JH and Zhang WH. 1996. An oblique cross section of Archean continental crust in Shanxi-Hebei-Nei Mongol junctve area, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 12(2): 222-238 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG, Guo JH and Liu WJ. 2001. An exposed cross-section of Early Precambrian continental lower crust in North China craton. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9-10): 781-792
- Zhang HF, Zhai MG, Santosh M, Diwu CR and Li SR. 2011. Geochronology and petrogenesis of Neorochean potassic meta-granites from Huai'an Complex; Implications for the evolution of the North China Craton. *Gondwana Research*, 20(1): 82-105
- Zhang JS, Dirks PHGM and Passchier CW. 1994. Extensional collapse and uplift in a polymetamorphic granulite terrain in the Archean and Palaeoproterozoic of North China. *Precambrian Research*, 67(1-2): 37-57
- Zhang LC, Zhai MG, Zhang XJ, Xiang P, Dai YP, Wang CL and Pirajno F. 2012. Formation age and tectonic setting of the Shirengou Neorochean banded iron deposit in eastern Hebei Province: Constraints from geochemistry and SIMS zircon U-Pb dating. *Precambrian Research*, doi: 10.1016/j.precamres.2011.09.007
- Zhao GC. 2007. When did plate tectonics begin on the North China craton? Insights from metamorphism. *Gondwana Research*, 14(1): 19-32
- Zhao GC, Wilde SA, Sun M, Guo JH, Kröner A, Li SZ, Li XP and Zhang J. 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
- Zhao ZP *et al.* 1993. *Precambrian Crustal Evolution of the Sino-Korean Paraplatform*. Beijing: Science Press, 1-444 (in Chinese)

附中文参考文献

- 白瑾, 黄学光, 戴凤岩, 吴昌华. 1996. 中国前寒武纪地壳演化. 第二版. 北京: 地质出版社, 1-228
- 耿元生, 刘敦一. 1997. 冀西北马市口地区紫苏花岗岩的岩石学、地球化学和同位素年代学. *岩石矿物学杂志*, 16(1): 1-9
- 郭敬辉, 翟明国, 张毅刚, 李永刚, 阎月华, 张雯华. 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
- 李江海, 钱祥麟, 黄雄南, 刘树文. 2000. 华北陆块基底构造格局及早期大陆克拉通化过程. *岩石学报*, 16(1): 1-10
- 刘富, 郭敬辉, 路孝平, 第五春荣. 2009. 华北克拉通 2.5Ga 地壳生长事件的 Nd-Hf 同位素证据: 以怀安片麻岩地体为例. *科学通报*, 54(17): 2517-2526
- 刘树文, 吕勇军, 凤永刚, 张臣, 田伟, 闫全人, 柳小明. 2007. 冀北红旗营子杂岩的锆石、独居石年代学及地质意义. *地质通报*, 26(9): 1086-1100
- 刘树文, 吕勇军, 王伟, 杨朋涛, 白翔, 凤永刚. 2011. 冀北太古代花岗质片麻岩的成因. *岩石学报*, 27(4): 909-921
- 沈保丰, 骆辉, 李双保等. 1994. 华北陆台太古宙绿岩带地质及成矿. 北京: 地质出版社, 1-202
- 沈其韩, 许慧芬, 张宗清, 高吉凤, 伍家善, 吉成林. 1992. 中国早前寒武纪麻粒岩. 北京: 地质出版社, 1-236
- 王仁民, 陈珍珠, 赖兴运. 1997. 华北太古宙从地幔柱体制向板块构造体制的转化. *地球科学*, 22(3): 317-320
- 王仁民, 董卫东. 1999. 冀西北高压麻粒岩带构造环境的再思考. *地学前缘*, 6(4): 347-351
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩等. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社, 1-104
- 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 韩秀伶, 李永刚. 1992. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及初步研究. *中国科学(B)*, (12): 1325-1330
- 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 李永刚, 李江海, 张雯华. 1996. 太古宙克拉通型下地壳剖面: 华北怀安-丰镇-尚义的麻粒岩系-角闪岩系. *岩石学报*, 12(2): 222-238
- 赵宗溥等. 1993. 中朝准地台前寒武纪地壳演化. 北京: 科学出版社, 1-444