https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.003

冀东—辽西太古宙火成岩岩石组合和动力学意义

刘树文[1],王 伟[2],白 翔[3],郭荣荣[4],付敬浩[1],郭博然[5],胡方泱[1],王茂江[1]

1.北京大学地球与空间科学学院,造山带与地壳演化教育部重点实验室,北京 100871
2.中国地质大学地球科学与资源学院,地质过程与矿产资源国家重点实验室,北京 100083
3.中国地震局地质研究所,活动构造与火山重点实验室,北京 100294
4.东北大学资源与土木工程学院,深部金属矿山安全开采教育部重点实验室,辽宁沈阳 110819
5.北京矿产地质研究院,北京 100012

摘要:冀东—辽西地区是华北克拉通北部出露面积最大的太古宙变质基底区.经过岩石组合填图和综合研究,将其太古宙变质火成岩分为2.64~2.60 Ga MORB型拉斑玄武质火山岩、2.61~2.52 Ga拉斑玄武质—钙碱性变质火山岩、2.52~2.50 Ga浅变质钙碱性火山岩组合和2.54~2.50 Ga英云闪长质—奥长花岗质—花岗闪长质片麻岩、2.54~2.51 Ga闪长质—石英闪长质—英云闪长质—奥长花岗质—花岗闪长质片麻岩、2.54~2.51 Ga紫苏花岗闪长质—紫苏花岗质岩石、2.57~2.52 Ga闪长质—石英二长闪长质—花岗闪长质—二长花岗质片麻岩和2.53~2.51 Ga弱片麻状到块状二长花岗质—正长花岗质深成侵入体岩石组合.这些岩石组合从东北部的辽西阜新到西南部的遵化马兰峪地区呈现出条带状时—空分布特征.变质作用研究揭示了青龙—上营—洒河桥—马兰峪为高压麻粒岩带,记录了ITD型*PTt*轨迹,与NNW-NW向SSE-SE方向逆冲推覆构造相伴生;而三屯营—太平寨高温麻粒岩带,记录了IBC型*PTt*轨迹,与锦州—兴城—安子岭—界岭口—太平寨—三屯营伸展—底劈构造带相伴生.综合分析表明冀东—辽西太古宙晚期的构造—岩浆活动形成于热造山带型俯冲—弧后伸展到碰撞隆升的侧向增生动力学过程.

关键词:冀东—辽西;太古代变质基底区;火成岩组合分带性;地壳侧向增生;热俯冲—碰撞造山带;岩石学.
中图分类号:P588 **文章编号**:1000-2383(2018)01-0044-13 **收稿日期**:2017-09-27

Lithological Assemblages of Archean Meta-Igneous Rocks in Eastern Hebei-Western Liaoning Provinces of North China Craton, and Their Geodynamic Implications

Liu Shuwen[1], Wang Wei[2], Bai Xiang[3], Guo Rongrong[4], Fu Jinghao[1], Guo Boran[5], Hu Fangyang[1], Wang Maojiang[1]

1.*The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education; School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing* 100871, *China*
2.*State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*
3.*Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing* 100294, *China*
4.*Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang* 110819, *China*
5.*Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing* 100012, *China*

Abstract: The eastern Hebei-western Liaoning provinces are the largest exposure regions of Archean basement rocks in the northern part of North China Craton. Comprehensive studies including detailed mapping of lithological assemblages reveal that the Archean basement rocks in the study regions can be subdivided into eight different assemblages, i.e., 2.64-2.60 Ga

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No.41530207);国家自然科学基金面上项目(No.41472165).
作者简介:刘树文(1958-),男,教授,主要从事前寒武纪地质学,结晶岩岩石学和岩石地球化学研究.ORCID: 0000-0003-3504-0988.
E-mail: swliu@pku.edu.cn; swliu1958@163.com

引用格式:刘树文,王伟,白翔,等,2018.冀东—辽西太古宙火成岩岩石组合和动力学意义.地球科学,43(1):44-56.

MORB-type metabasaltic rocks; 2.61－2.52 Ga metamorphosed tholeiitic to calc-alkaline volcanic rocks; 2.52－2.50 Ga calc-alkaline volcanic rocks with low metamorphic grade; 2.54－2.50 Ga tonalitic-trondhjemitic-granodioritic gneisses; 2.54－2.51 Ga dioritic-quartz dioritic-tonalitic-trondhjemitic-granodioritic gneisses; 2.54－2.51 Ga enderbites and charnockites; 2.57－2.52 Ga dioritic-quartz monzodioritic-granodioritic-monzogranitic gneisses; and 2.53－2.51 Ga weakly gneissic to massive monzogranitic to syenogranitic plutonic rocks. The above lithological assemblages show apparently banded spatial distribution patterns from Fuxin area of western Liaoning in the northeast to the Malanyu area of Zunhua in the southwest. Metamorphic studies indicate that high pressure granulites outcropped in the Qinglong-Shangying-Saheqiao areas record typical isothermal decompression (ITD)-type metamorphic *P-T-t* paths, which are associated with the thrusting structures from NNW-NW to SSE-SE. In contrast, isobaric cooling (IBC)-type metamorphic *P-T-t* paths are recorded by the high-temperature granulites from Santunying-Taipingzhai areas, which were accompanied by extensional diapiric structures in the Jinzhou-Xingcheng-Anziling-Jiehekou-Taipingzhai-Santunying regions. Accordingly, it is suggested that the Late Archean tectonothermal events in the eastern Hebei-western Liaoning provinces could have been generated under a typical Archean hot orogenic belt, evolving from subduction and back-arc extension to the final collision.

Key words: eastern Hebei-western Liaoning provinces; Archean metamorphic basement area; banded spatial and temporal distribution of meta-igneous rock; lateral crustal growth; hot subduction-collision orogenic belt; petrology.

在这金秋时节,迎来了董申保院士 100 年华诞,先生和蔼可亲的身影似乎就在笔者身边,先生的谆谆教诲始终铭刻在心.为了传承董先生严谨、创新的科学精神,近十年来在国家自然科学基金项目持续资助下,笔者带领的北京大学前寒武纪研究组对冀东－辽西、辽东－辽北、吉南和鲁西太古宙变质基底区开展了太古宙变质火山岩、侵入岩岩石组合填图研究.该火成岩岩石组合填图是在原来 1/20 万变质基底区地质图基础上,针对前寒武纪变质基底区的变质变形岩石组合特征进行的尝试性小比例尺非正规填图,填图目的在于确定具有成因联系的一套火成岩的岩石学、时间和空间分布特征,进而分析太古宙壳幔作用和动力学过程.下面以冀东－辽西太古宙变质基底区为例,介绍一下岩石组合填图方法、成果和意义.

1　太古宙火成岩岩石组合填图和综合研究的方法

笔者近年来的岩石组合填图主要集中在冀东－辽西地区、辽东－辽北－吉南地区和鲁西地区 1/20 万地质图上太古宙变质基底区的火成岩,包括变质火山岩和花岗质片麻岩、花岗岩侵入体,主要的岩石组合填图方法和综合研究方法简述如下:(1)首先对预选填图区进行路线踏勘,了解研究区火成岩岩石种类和大致空间分布、不同岩石类型之间的接触关系;(2)划分填图地质单元,每一个地质单元与其他地质单元有明显的岩石类型差别和较为明确的接触关系,大致分为整合接触、角度不整合接触或者沉积不整合、构造接触、侵入接触和渐变过渡接触等;(3)按照 1/ 20 万地质图比例尺确定大致点距和线距,但是这些点距和线距都不是严格按照 1/20 万地质图比例尺执行的,而是根据其变化程度确定定点疏密程度,目的在于有效限定所涉及地质单元的边界,填制岩石单元地质草图.这个岩石单元可能包括 1 个岩石类型或者具有渐变关系的岩石类型;(4)进行各填图单元构造要素测量和吴氏网统计,分析不同单元的构造样式并对比;(5)以岩石类型为单位,考虑到空间控制进行样品采集;(6)进行室内显微镜下岩相学分析,进一步确定各填图单元的岩石学特征,包括岩石结构和构造、矿物组合和变质变形特征;(7)根据具体研究需要,进行岩石粉碎、单矿物分离、单矿物和全岩的各类常量元素、微量元素和同位素分析;(8)确定各单元岩石的时代、成因和不同类型岩石之间的成因联系;(9)将大致相同时代和具有明确成因联系的一套岩石或者岩石单元合并为同一个岩石组合,在岩石单元图基础上编制出岩石组合图,作为深入研究和发表文章的基本图件.

2　冀东－辽西太古宙变质基底区火成岩岩石组合图

2.1　新太古代变质火山岩

图 1 是压缩后小比例尺的冀东－辽西太古代火成岩地质简图.填图结果表明太古代变质基底区的表壳岩非常复杂,其中变质火山岩大致可以分为 3 套:(1)MORB 型变质拉斑玄武岩组合,与该组合伴生有大量的磁铁石英岩和小型 BIF 型铁矿,主要分布在阜新以北的太古宙变质基底区的北缘地区(图

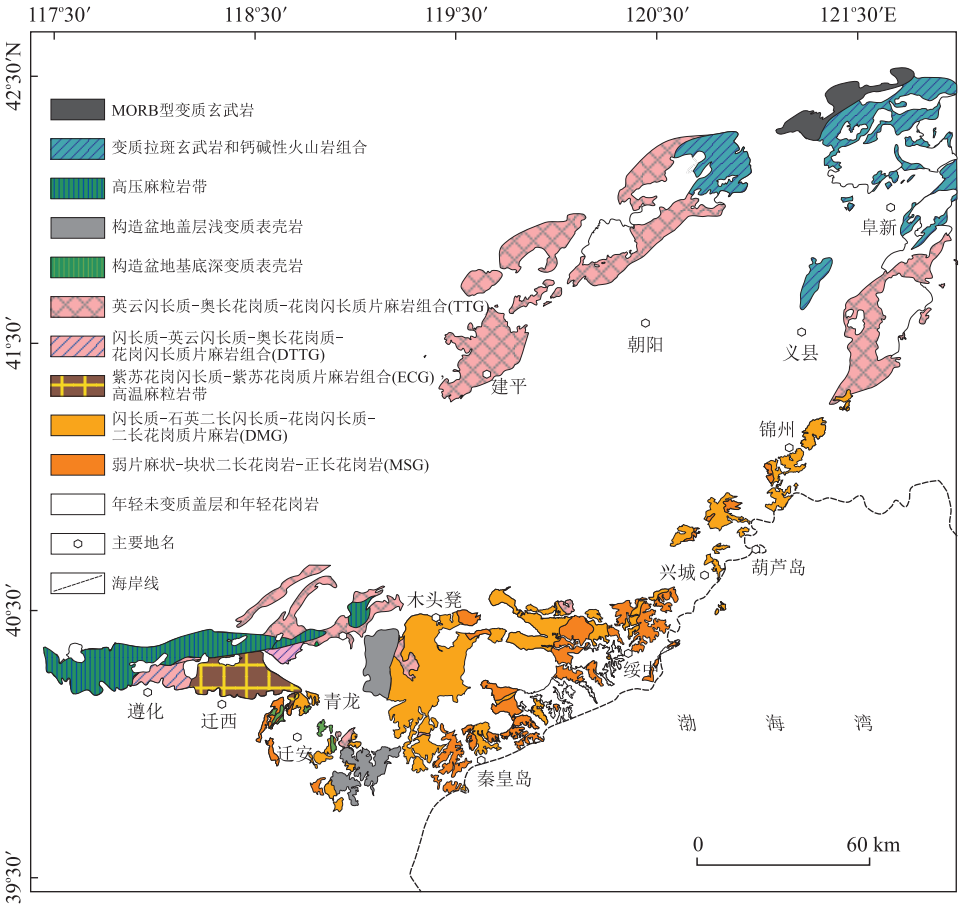

图 1 冀东－辽西地区岩石组合分布

Fig.1 Geological distribution of Archean igneous lithological assemblages in eastern Hebei-western Liaoning provinces

1 右上角),高绿片岩相－低角闪岩相变质作用,主要的构造样式为 NWW-SEE 向展布的同斜褶皱和倒转褶皱、韧性剪切带等线性构造带,褶皱轴面和构造面理南倾(图 2a).详细的锆石年代学研究表明,该套岩石组合形成于 2 640～2 603 Ma(Wang *et al*., 2011, 2013, 2015; 王伟等,2015);(2)变质拉斑玄武岩－钙碱性玄武安山岩－安山岩－英安岩火山岩组合,伴生有小规模 BIF 型铁矿,主要分布在阜新－朝阳地区,位于 MORB 型变质火山岩组合以南(图 1),角闪岩相变质作用,构造样式为轴面向 NW-NNW 向倾斜的歪斜褶皱、倒转褶皱和同斜褶皱等,其形成时代为 2 614～2 523 Ma(图 2b; Wang *et al*., 2011, 2013, 2015; 王伟等,2015).在朝阳－建平－义县地区和冀东遵化－洒河桥－青龙地区,该岩石组合以闪长质－石英闪长质－英云闪长质－奥长花岗质－花岗闪长质(DTTG)片麻岩中不同规模表壳岩捕虏体的形式产出,局部达到麻粒岩相变质.在冀东滦河以西的大部分地区构造线走向渐变为近 S-N 向的高角度的直立褶皱、歪斜褶皱和倒转褶皱等,褶皱轴面和片麻理西倾.这些变质火山岩的形成时代与阜新－朝阳地区变质钙碱性火山岩一致(Wang *et al*., 2011, 2015; Guo *et al*., 2013, 2015, 2017a; Bai *et al*., 2014);(3)迁安－滦县－卢龙地区太古宙表壳岩分为下部的原迁西群高角闪岩相表壳岩系中的变质火山岩以钙碱性火山岩为主体,主要岩性为变质钙碱性玄武安山岩、安山岩、英安岩(即大量的石榴石黑云变粒岩),明显经历了两期变形作用,早期构造面理走向为近 EW-NE(E)向,被晚期近 SN 向构造强烈改造(图 2c,图 3a),其形成时代大致为～2 545 Ma,局部保留了 3.4～2.9 Ga的古老变质地块(Nutman *et al*., 2011; Liu *et al*., 2013).这些深变质的古老变质地块和新太古代的变质火山岩、磁铁石英岩和 BIF 铁矿构成了青龙－迁安－卢龙－滦县构造盆地的基底.上部岩系为原双山子群、朱杖子群和滦县群,以浅变质火山碎屑岩、陆源碎屑岩、石英岩、磁铁石英岩和碳酸盐岩等为主,组合有 BIF 型铁矿.底部为底砾岩,角度不整合覆盖在基底变质表壳岩和 DTTG 片麻岩之上.

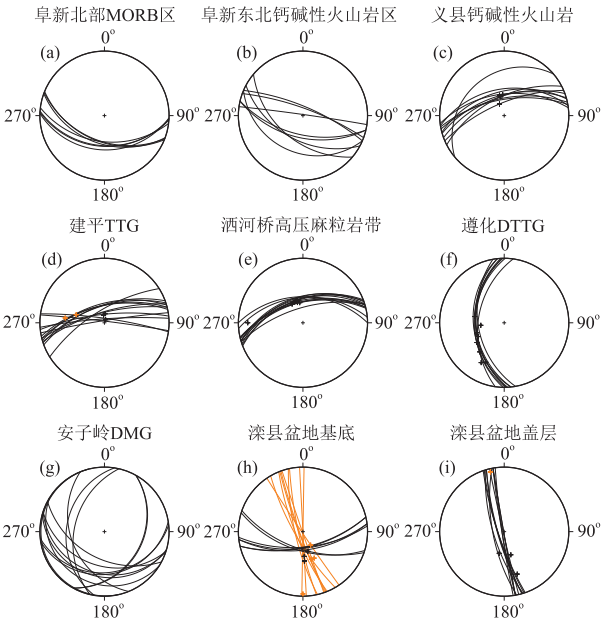

图 2　冀东－辽西太古代火成岩构造面理－矿物线理吴氏网投影(下半球)

Fig.2　Stereographic projections (Wulff net, lower hemisphere) showing the tectonic foliation and stretching lineation of minerals for the Archean meta-igneous rocks in the western Liaoning-eastern Hebei provinces

其中大圆弧为面理,十字为矿物线理

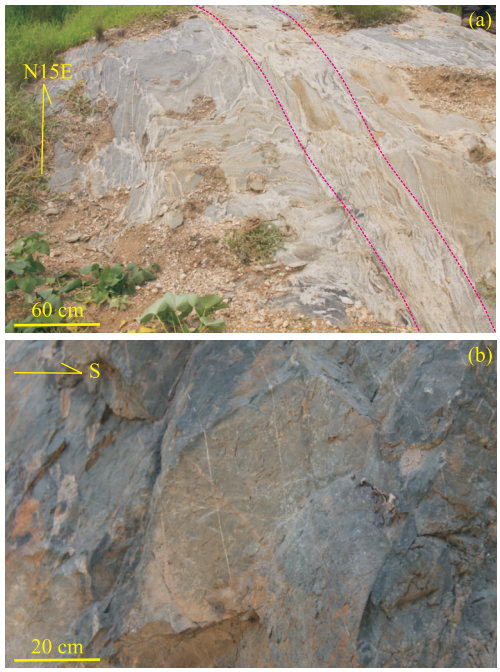

图 3　新太古代盆地基底岩石两组面理交切关系(a)和盖层玄武岩的枕状构造(b)

Fig.3　The intersection relationship between two episodes of foliation for the basement rocks (a) and pillow basalts preserved in the overlying strata (b) within the Neoarchean basin

底砾岩之上是变质程度较低的厚层－中层钙碱性玄武岩、玄武安山岩,具有明显的变质枕状构造,夹有少量的英安岩(图 3b).该套变质岩系遭受了低绿片岩相－绿片岩相变质作用,构造样式以近 SN 向直立紧闭褶皱、歪斜褶皱和倒转褶皱为主,发育大规模近 SN 向韧性－韧脆性剪切带,主要为走滑型剪切带,其走向为近 SN 向,与滦河以西地区变质基底区构造线方向和变形特征基本一致(图 2d),形成了典型的太古宙末期的构造盆地(图 1).其形成时代为 2 503～2 522 Ma,保存有 2 567～2 654 Ma、2 802 Ma 和 2 904 Ma 的继承锆石(Lü *et al*., 2012; 郭荣荣等,2014).

2.2　新太古代深成片麻岩

太古宙变质和未变质的深成侵入体较为复杂,归纳起来可分为:(1)英云闪长质－奥长花岗质－花岗闪长质(TTG)片麻岩组合,(2)闪长质－石英闪长质－英云闪长质－奥长花岗质－花岗闪长质(DTTG)片麻岩组合,(3)紫苏石英闪长岩－紫苏花岗闪长岩－紫苏花岗岩(ECG)组合,(4)闪长质－石英二长闪长质－花岗闪长质－二长花岗质片麻岩(DGM)组合,(5)块状二长花岗岩－正长花岗岩(MSG)组合.

其中 TTG 片麻岩组合主要分布在朝阳－建平－义县宽城东南和都山以北地区,是典型的 TTG 片麻岩,主体是角闪岩相变质作用,建平西南局部达到角闪麻粒岩相变质级,构造样式主要为线型构造,优选构造方位为 NE-SW 走向,线型构造主要由不对称褶皱和构造面理组成,其褶皱轴面主体上 NEE-SWW 走向,低角度倾向 NNW(图 2d).其形成时代为 2 538～2 502 Ma,其中有 2 565～2 550 Ma 的捕获锆石,与区域上变质钙碱性火山岩形成时代一致(Liu *et al*., 2011; Wang *et al*., 2011, 2012, 2013, 2015).

DTTG 片麻岩组合主要分布在遵化－三屯营－崔杖子地区.该岩石组合最突出的特征是存在大量的闪长质－石英闪长质片麻岩.该岩石组合的另一重要特征是岩性明显不均一,1/5 万地质填图试点将其中的中酸性端元定义为小关庄片麻岩和秋花峪片麻岩(刘武旭等,1993),分布在青龙崔杖子地区的酸性端元被称为崔杖子片麻岩(刘树文,1994).该类片麻岩总体上为角闪岩相变质,局部存在角闪麻粒岩相变质作用.变形作用较为复杂,洒河桥以南－三屯营－遵化地区主要表现为线性构造带,构造线方向为近 S-N 走向向西陡倾,洒河桥－金厂峪以北－青龙地区以

NE-NEE走向为主(图2f).该套岩石组合的形成时代为2 535～2 513 Ma，保存有2 634～2 570 Ma的继承锆石,遵化西部的表壳岩捕虏体中发育～2.9～3.4 Ga碎屑锆石(Bai *et al*., 2014, 2015; Fu *et al*., 2016).这些继承锆石年龄与区域上变质火山岩的形成时代相当(Wang *et al*., 2011, 2013, 2015; Guo *et al*.,2013, 2015, 2017a; Bai *et al*., 2014).

ECG岩石组合主要分布在洒河桥－金厂峪以南－三屯营－太平寨－水厂地区,主要由麻粒岩相变质的紫苏石英闪长质、花岗闪长质片麻岩和紫苏花岗岩组成,经历了麻粒岩相变质作用,主要构造样式为一系列NE走向的开阔卵型褶皱和韧性剪切带构成,前人研究称为卵型构造区,其滦河以西地区明显受到了SN向构造的强烈改造,而表现为线型构造.该套岩石组合形成时代2 515～2 531 Ma (Bai *et al*., 2015, 2016).

DMG片麻岩组合主要分布在研究区的东南部界岭口、安子岭、绥中以北－兴城－锦州以北地区,主体岩性为闪长质、石英二长闪长质－似斑状花岗闪长质－似斑状二长花岗质片麻岩.界岭口岩体主要为闪长质－石英二长闪长质片麻岩,安子岭地区表现为强烈混合岩化,主要为闪长质－石英二长闪长质片麻岩端元和二长花岗质片麻岩不同比例的混合体.兴城－锦州北部地区主要为似斑状石英二长闪长质片麻岩,表现为不同程度的糜棱岩化,形成石英二长闪长质、花岗闪长质到二长花岗质糜棱片麻岩、糜棱岩到超糜棱岩.其主体为角闪岩相变质作用,变形作用差异性较大.其中界岭口－安子岭－绥中北部地区以卵型构造为主,西部边缘和岩体内部可见与滦县群浅变质岩系协调一致的近SN向或者弧形构造面理.兴城－锦州以北地区以大型近EW向近水平剪切带和EW走向北倾逆冲推覆构造为主,叠加了NE-NEE走向、NW走向高角度以走滑分量为主的韧性剪切带变形改造,构成了典型的剪切带网络.安子岭地区绝大部分岩石表现为片麻状卵型构造特征,主要表现为片麻理的开阔褶皱,褶皱轴面走向为NE-NEE向,局部保存有近EW向构造面理,并被晚期NS向走滑型剪切带改造,与迁安－滦县－卢龙新太古代盆地基底表壳岩系和花岗质片麻岩的构造特征相一致(图2g).该岩石组合的形成时代为2 595～2 524 Ma,平均值在～2 540 Ma,其中含有～3 784～2 900 Ma、～2 610 Ma捕获锆石(Yang *et al*., 2008; Nutman *et al*., 2011; Wang *et al*., 2016; 笔者未发表的资料).该DMG岩石组合大部分岩石具有较高的$Mg^{\#}$值,与赞岐岩类岩石的地球化学特征基本一致.

MSG岩石组合即前人定义的秦皇岛花岗岩和绥中花岗岩,主要分布在研究区南部的秦皇岛－绥中－兴城以西地区,片麻理很弱,主要为块状花岗岩,侵位于DMG组合中,并截断大型近水平韧性剪切带,其形成时代为2 527～2 511 Ma,其中有2 647～2 565 Ma的继承或者捕获锆石(Yang *et al*., 2008; Nutman *et al*., 2011; Fu *et al*., 2017).本次岩石组合填图的年代学研究表明原来定义的秦皇岛花岗岩和绥中花岗岩中存在约1/3的中生代花岗岩,应从太古宙花岗岩中剔除(图1中秦皇岛－绥中花岗岩带的空白区).

3 各岩石组合的岩石成因

岩石成因研究表明MORB型火山岩的原生岩浆形成于洋中脊背景下亏损或不亏损软流圈地幔物质的部分熔融(Wang *et al*., 2011; Guo *et al*., 2013; Bai *et al*., 2014; 王伟等, 2015).

锆石年代学揭示分布在义县－阜新－朝阳北部－冀东青龙－遵化地区早期变质拉斑玄武质、钙碱性火山岩组合形成于2 614～2 523 Ma,总体上晚于早期MORB型变质火山岩.形成于俯冲流体交代原始地幔或者交代地幔楔的部分熔融,并经历结晶分异作用.其中一些英安岩类形成于初生地壳物质的部分熔融.分布于遵化、洒河桥－上营南部区域的变质钙碱性火山岩中局部保留有～2 770 Ma和2 775 Ma的捕获锆石(Liu *et al*., 2011; Wang *et al*., 2011, 2015; Guo *et al*., 2013,2015, 2017a; Bai *et al*., 2014; 王伟等, 2015).

主要分布在冀东地区的从青龙双山子、朱杖子地区到司家营铁矿地区的变质火山岩组合,形成于2 522～2 503 Ma,其下部为底砾岩,并以角度不整合覆盖于下部的变质火山岩、DTTG片麻岩和DMG、ECG和MSG岩石组合之上.岩石成因研究表明,其中的变质玄武岩起源于岩石圈地幔低度部分熔融并受到大陆地壳物质混染,变质安山岩和变质酸性岩分别由受到地壳物质混染的弧下地幔楔和初生地壳熔融形成(Lü *et al*., 2012; 郭荣荣等, 2014).

分布在冀东都山两侧、辽西建平－义县的典型TTG片麻岩组合主要形成于初生地壳岛弧火山岩和俯冲洋壳板片的部分熔融(Wang *et al*. 2012, 2013; Bai *et al*., 2016).

主要分布于冀东遵化－上营地区的DTTG片

麻岩,含太平寨以北少量麻粒岩相变质的 DTTG 片麻岩是交代地幔楔部分熔融形成的石英闪长质岩浆结晶分异产物,其堆晶体为角闪石岩包体和斑杂状闪长质岩石,分离结晶熔体相形成英云闪长岩和奥长花岗岩,花岗闪长岩分布量极少.其中石英闪长质(含闪长质)片麻岩占据了该岩石组合的 50%左右,结合其南部发育 3.4～2.9 Ga 的古老碎屑锆石和岩石记录,该岩石组合形成于岛弧—弧后盆地的构造背景(图 1; Liu *et al*., 2013; Bai *et al*., 2014, 2015, 2016; Fu *et al*., 2016).

主要分布在冀东太平寨—渔户寨地区的 ECG 岩石组合具有赞岐岩的某些地球化学特征,主要形成于俯冲板片流体、熔体交代的地幔楔物质的部分熔融,并受到了大陆地壳物质的混染,经历了斜长石、角闪石和单斜辉石的分离结晶,是在弧后环境下侵位结晶的(Bai *et al*., 2015, 2016).

主要分布在界岭口—安子岭—绥中以北—兴城—锦州以北地区 NE 向带状分布的 DMG 和 MSG 岩石组合构成了研究区东南部的大规模钾质花岗岩带.其中 DMG 岩石组合的大部分岩石具有赞岐岩的地球化学特征,主要形成于俯冲板片流体、熔体交代地幔楔部分熔融形成的岩浆,并发生了明显的大陆地壳混染和分离结晶,即 AFC 过程(Yang *et al*., 2008; Wang *et al*., 2016;笔者未发表的资料).而分布在秦皇岛—绥中地区弱变形到未变形的 MSG 岩石组合主要形成于闪长质—石英二长质—花岗闪长质—二长花岗质片麻岩组合低压下的部分熔融和结晶分异作用(Fu *et al*., 2017),产出于俯冲相关的弧后伸展构造背景.

4　冀东—辽西地区新太古代动力学分析

4.1　区域变质作用与高级变质双带

作为我国高级变质地质体和前寒武纪变质基底出露最大、岩石组合最全、富含丰富的 BIF 型铁矿资源的冀东地区,其变质作用历来受到广大研究者们的关注.在 20 世纪 90 年代初,笔者在此完成博士学位论文研究期间,就对上营到马兰峪地区的变质作用进行了讨论,使用传统的单斜辉石—斜方辉石地质温度计(Lindsley and Dixon, 1976)、石榴石—单斜辉石—斜方辉石地质压力计,初步确定了该构造带遵化—洒河桥—上营地区石榴石角闪二辉麻粒岩和石榴石二辉石角闪斜长片麻岩的变质温压条件,主期变质 *P-T* 条件分别为 753～809 ℃和1.11～1.25 GPa,峰期变质 *P-T* 条件分别为 720～755 ℃和 0.96～1.13 GPa(刘树文等,1991),并用角闪石环带的热力学计算方法确定了石人沟地区石榴石二辉石角闪斜长片麻岩的角闪石记录的变质作用 *P-T* 条件分别为 736～865 ℃和 0.64～1.01 GPa,与石榴石—二辉石温度—压力计计算结果相比温度偏高,压力偏低.

近年来冀东变质基底区变质作用研究取得了重要进展,主要表现在太平寨地区变质作用的视剖面研究,Kwan *et al*.(2016)利用 Thermocalc 软件计算的视剖面限定三屯营—太平寨石榴石角闪二辉石麻粒岩的 *P-T* 条件为峰前 600～715 ℃、0.6 GPa,峰期 860～900 ℃、0.96～1.03 GPa,峰后 790～810 ℃、0.96～1.04 GPa,构成了一条 IBC 型逆时针 *PTt* 轨迹,据此作者认为冀东地区形成于太古宙晚期地幔柱动力学体制.然而三屯营—太平寨地区缺少与地幔柱构造体制相匹配的深部地幔来源的铁镁质岩浆作用,并且上述研究忽略了区域上大面积分布钙碱性火山岩和不同成分花岗质岩石的带状分布特征.Duan *et al*.(2017)确定了太平寨地区花岗质片麻岩中 3 个副变质岩样品的变质条件,认为最终 *P-T* 条件为 870～890 ℃和 0.80～0.95 GPa、峰期温度 $T>950$ ℃、压力 $P=0.9$ GPa,峰后阶段(后生合晶集合体)的 *P-T* 条件分别为 830～880 ℃和 1.0～1.2 GPa,仍然记录了等压降温(IBC 型)的 *PTt* 路径.结合前人有效 *P-T* 分析数据,三屯营—太平寨地区构成了 IBC 型 *P-T* 路径,大部分 *P-T* 点落在了 HT-UHT 变质域(图 4,

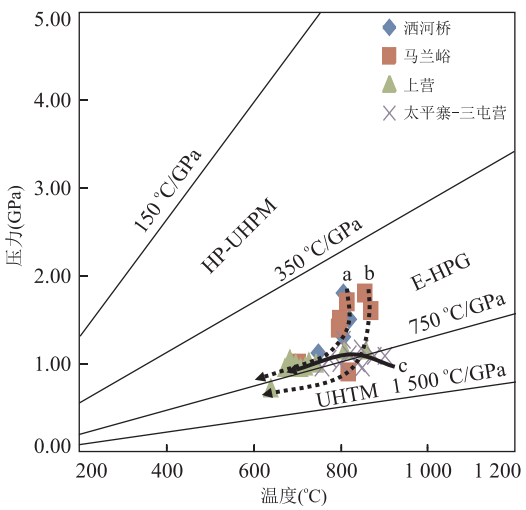

图 4　冀东新太古代末期变质作用的 *P-T* 条件和演化

Fig.4　Metamorphic *P-T* conditions and evolution at the end of Neoarchean in the eastern Hebei Province

表 1 冀东地区有效变质温度－压力条件

Table 1 Effectively metamorphic *P-T* conditions in the eastern Hebei basement region

地点	样品	石榴石－单斜辉石 REE 压力计	变质温度(℃)	变质压力(10^3 MPa)	参考文献
洒河桥	JD1523D2 内核	石榴石－单斜辉石 REE 压力计	822	1.50	Yang and Wei, 2017b
洒河桥	D2 边缘	石榴石－单斜辉石 REE 压力计	808	1.30	Yang and Wei, 2017b
洒河桥	D010-2	石榴石－单斜辉石温度－压力计	753	1.11	刘树文等,1991
马兰峪	JD1547 内核	石榴石－单斜辉石 REE 压力计	816	1.70	Yang and Wei, 2017b
洒河桥	JD1547 边缘	石榴石－单斜辉石 REE 压力计	797	1.40	Yang and Wei, 2017b
洒河桥	YC8-16	石榴石－单斜辉石 REE 压力计	858	1.80	Yang and Wei, 2017b
洒河桥	YC8-24	石榴石－单斜辉石 REE 压力计	873	1.60	Yang and Wei, 2017b
洒河桥	YC223	石榴石－单斜辉石 REE 压力计	802	1.50	Yang and Wei, 2017b
洒河桥	YC134	石榴石－单斜辉石 REE 压力计	819	0.90	Yang and Wei, 2017b
洒河桥	YC8-43D2	石榴石－单斜辉石 REE 压力计	810	1.80	Yang and Wei, 2017b
马兰峪	M509-1	石榴石－单斜辉石温度－压力计	706	1.00	刘树文和林强,1992
石人沟	L6M-1	石榴石－单斜辉石温度－压力计	739	0.95	刘树文和林强,1992
上营	348-2	石榴石－单斜辉石温度－压力计	860	1.14	刘树文和林强,1992
上营	518-1	石榴石－单斜辉石温度－压力计	747	1.00	刘树文和林强,1992
上营	B031-1	石榴石－单斜辉石温度－压力计	812	1.15	刘树文等,1991
上营	500-1	石榴石－单斜辉石温度－压力计	699	1.00	刘树文和林强,1992
上营	515-4	石榴石－单斜辉石温度－压力计	722	0.96	刘树文和林强,1992
冷嘴头	D020-1	角闪石环带温压计	730	1.02	刘树文等,1991
冷嘴头	D020-1	角闪石环带温压计	710	0.95	刘树文等,1991
冷嘴头	D020-1	角闪石环带温压计	675	0.94	刘树文等,1991
冷嘴头	D020-1	角闪石环带温压计	687	1.04	刘树文等,1991
冷嘴头	D020-1	角闪石环带温压计	642	0.71	刘树文等,1991
太平寨	413-2	石榴石－斜方辉石－单斜辉石温度－压力计	850	1.16	刘树文等,1991
太平寨	T1-5	石榴石－斜方辉石－单斜辉石温度－压力计	841	1.00	刘树文和林强,1992
太平寨	T2-2	石榴石－斜方辉石－单斜辉石温度－压力计	777	1.05	刘树文和林强,1992
太平寨	T1-5	石榴石－斜方辉石－单斜辉石温度－压力计	760	0.95	刘树文和林强,1992
太平寨	T1-5	似剖面方法的温度压力范围	906	1.08	Kwan *et al*., 2016
太平寨	T1-5	似剖面方法的温度压力范围	880	1.08	Kwan *et al*., 2016
太平寨	T1-5	似剖面方法的温度压力范围	800	1.00	Kwan *et al*., 2016

Brown, 2007),主要原因不是它们表现异常高的变质温度,而是三屯营－太平寨地区的麻粒岩相变质作用的压力相对较低,投入到 Brown(2007)定义的 HT-UHT 变质域.

Yang and Wei(2017b)根据石榴石－单斜辉石－斜方辉石－斜长石－石英矿物组合认为三屯营－太平寨地区经历了超高温变质作用,最高温度可达 1 050～1 100 ℃,而洒河桥和马兰峪地区的麻粒岩相变质岩石主要变质条件分别为 808～822 ℃、1.3～1.8 GPa 和 797～873 ℃、0.9～1.8 GPa,更重要的是两个样品矿物内核到边缘的分析给出强烈等温降压的 *P-T* 演化特征,例如洒河桥样品内核 *P-T* 条件为 822 ℃、1.5 GPa,而边缘 808 ℃、1.3 GPa,而马兰峪地区内核 *P-T* 条件为 816 ℃、1.7 GPa,而边缘 797 ℃、1.4 GPa,显然该带变质作用发生在榴辉岩－高压麻粒岩域,变质作用演化是 ITD 型,麻粒岩相变质岩石经历了绝热抬升 6～10 km(图 4)(Yang and Wei, 2017a).前人对上营－冷嘴头地区有效 *P-T* 数据表明,上营地区变质作用的 *P-T* 条件为 699～860 ℃、0.96～1.1 GPa,遵化冷嘴头地区变质作用的 *P-T* 条件为 642～739 ℃、0.71～1.04 GPa(表 1,刘树文等, 1991).新近研究和前人研究的变质作用 *P-T* 条件均落在榴辉岩－高压麻粒岩变质域(图 4).

因此按照 Brown(2007)区域变质作用的分类,笔者定义三屯营－太平寨构造带为高温麻粒岩带,而上营－洒河桥－麻粒岩构造带为高压麻粒岩带,构成冀东地区高温变质双带.该变质双带不仅仅变质作用的 *P-T* 条件上有明显差别,而且变质作用的 *P-T* 路径明显不同,前者为 IBC 型,后者为 ITD 型(图 4).根据 Brown(2007)解释具有 ITD 型 *PTt* 轨迹的高压麻粒岩带形成于板片俯冲－折返动力学机制,并且板片俯冲深度已经到达地幔深度.而高温麻粒岩带记录了 IBC 型 *PTt* 轨迹,形成于岩浆增生的构造背景(Groppo and Rolfo, 2008),区域上与锦州－兴城－安子岭－太平寨－三屯营太古代伸展变

形带和花岗质片麻岩底劈形成的卵形构造域相伴生,与上覆形成于太古代末期构造盆地时代一致,表明太平寨－三屯营高温麻粒岩带形成于岩浆增生的伸展背景,最有可能为弧后伸展构造或者俯冲板片断离后高温伸展背景.

4.2　太古宙变质基底区的岩石组合分带性及其动力学意义

通过前述岩石组合的空间分布、岩石成因和时代研究,笔者将冀东－辽西地区太古代变质基底区分为 3 个主要的构造带:(1)分布在阜新－朝阳北部的大洋地壳变质玄武岩带(图 2),主要由 N-MORB 和 E-MORB 组成,含有条带状磁铁石英岩和一系列小规模 BIF 铁矿床,形成时代为～2.64～2.60 Ga,代表了本区残留的大洋地壳残片;(2)阜新－朝阳－建平－青龙－上营－洒河桥－马兰峪岛弧构造带,广泛发育变质火山岩组合,如初始弧型拉斑玄武岩－钙碱性玄武岩－安山岩－英安岩等,与 NMORB-EMORB 构造带呈韧性变形带接触.该带的变质火山岩中广泛发育(但是总体上少量)具有富 Nb 玄武岩、类玻安岩地球化学特征的变质玄武安山岩,大量发育 Nb、Ta、Ti 亏损的钙碱性火山岩岩石系列,岩石成因主要与洋壳俯冲的地幔楔岩浆作用相关联.该岩石组合的主体形成时代为～2.61～2.54 Ma,形成于大洋岛弧构造环境,北部为弧前增生楔构造环境.这个过程中洋壳俯冲开始的时间>2.61 Ga.该构造带中北部的阜新－义县－朝阳－建平地区广泛发育 2.54～2.50 Ga 的 TTG 片麻岩,形成于岛弧根部初生地壳物质的部分熔融. 该带西南部分的马兰峪－遵化－三屯营一带逐渐过渡为弧后构造背景,既有 Nb、Ta、Ti 亏损的钙碱性变质火山岩组合又有广泛发育的 DTTG 侵入岩岩石组合,该变质火山岩和 DTTG 片麻岩均形成于俯冲板片之上地幔楔岩浆作用和相关的壳幔作用,尤其是 DTTG 岩浆作用主要形成于地幔楔来源的闪长质－石英闪长质岩浆的结晶分异作用,表明它们侵位于相对稳定的构造－岩浆环境,西南部与～2.9 Ga微陆块接壤部位保留了～3.4～2.9 Ga 碎屑锆石和～2.7 Ga 的碎屑、继承锆石(Guo *et al*., 2013,2015, 2017a,2017b; Bai *et al*., 2014, 2015, 2016; Fu *et al*., 2016; Duan *et al*., 2017;熊乐等, 2017);(3)活动大陆边缘和碰撞后伸展构造带.该构造带岩石组合较为复杂,突出地表现在一系列中太古代古老陆块中,例如遵化草场地区出露的～2.9 Ga的古老角闪岩相变质钙碱性火山岩、曹庄地区出露的>3.0 Ga 的角闪岩相变质表壳岩和～2.9 Ga二长花岗质片麻岩侵入体等(Wilde *et al*., 2008; Nutman *et al*., 2011; Liu *et al*., 2013).与中－古太古代变质地块相伴生的有分布在三屯营－太平寨－水厂地区的 2 531～2 515 Ma ECG 岩石组合和分布在界岭口、安子岭、绥中以北－兴城－锦州以北地区 2 562～2 524 Ma 具有赞岐岩类岩石地球化学特征的 DMG 岩石组合、2 527～2 511 Ma 秦皇岛－绥中地区 MSG 岩石组合和双山子－迁安－滦县－卢龙一带上覆构造盆地 2.511～2.506 Ga 浅变质盖层的岩石组合.局部保存有 2.56～2.54 Ga 的钙碱性变质火山岩、变质泥质岩和细碎屑岩和 BIF 建造,其中副变质岩中保存有 3.8～2.7 Ga 的碎屑锆石(Lü *et al*., 2012; 郭荣荣等, 2014),2.56～2.54 Ga 变质火山岩和 DMG 深成片麻岩与阜新－义县－朝阳－建平地区的变质火山岩时代相当,都形成于俯冲板片流体、熔体交代地幔楔岩浆作用,是同一构造体制下岩浆作用的结果.2.53～2.51 Ga 晚期的岩浆作用,包括三屯营－太平寨 ECG 岩石组合和秦皇岛－绥中 DMG 岩石组合直接或者间接与地幔楔岩浆作用相关联,秦皇岛－绥中 MSG 主要形成于 DMG 岩石组合部分熔融作用.该构造带于～2.52～2.49 Ga 形成于以伸展变形为主的下地壳构造层次近水平伸展构造带,在锦州以北－兴城以北地区表现为大型拆离韧性剪切带,导致卷入到该带中的早期花岗质侵入体固态韧性底劈、亚固半塑性底劈,形成标志性的卵型构造区,包括三屯营－太平寨卵型构造区、界岭口－安子岭－绥中卵型构造区(带).同时双山子－朱杖子－迁安东南－卢龙－滦县地区拉分盆地上部盖层,与底砾岩相伴生的枕状玄武岩、变质英安岩形成时代 2.50～2.51 Ga(Lü *et al*., 2012; 郭荣荣等, 2014),说明它们是与伸展变形带同时形成的弧后盆地沉积和火山喷发;(4)青龙－洒河桥－马兰峪弧－陆碰撞高压麻粒岩构造带的岩石组合主要包括 2.54～2.51 Ga 变质拉斑玄武岩、钙碱性变质火山岩、～2.90 Ga 的钙碱性变质火山岩微陆块和 DTTG 片麻岩组合的一部分.它们经历了 2.51～2.45 Ga多阶段高压角闪岩相－麻粒岩相变质作用.遵化北－洒河桥以北－上营－青龙一带主要表现为 NE-NEE 构造线方向和 NNW 向 SSE 方向的逆冲推覆,南部的三屯营到马兰峪地区主要表现为近 SN 向构造线,以大型 SN 向走滑型构造带为主体.在滦县盆地的基底片麻岩中可清楚地看到 SN 向走滑型韧性剪切带截断近 EW-NEE 向构造面理,盆地

上覆盖层中只发育了高角度近直立的走滑型构造面理,而 SN 向走滑型构造面理与马兰峪地区构造面理产状基本一致,并叠加到三屯营－太平寨地区滦河以西的卵型构造区之上,说明 SN 向走滑变形形成于区域性伸展底劈作用以后的太古宙末－古元古代早期,因为遵化－宽城一带长城系未变质盖层覆盖在近 SN 向线性构造带之上.在青龙－上营－洒河桥－马兰峪高压麻粒岩带中被 SN 走向构造改造的早期构造面理走向为 NE-NEE 向构造,反映了 NNW-NW 向 SSE-SE 向逆冲推覆的构造特征.因此该构造带代表了一条太古宙末－古元古代初期与麻粒岩相变质作用同时发生的碰撞造山带.遵化北－洒河桥－上营－青龙高压麻粒岩 NE-NEE 向线性构造域在西部的马兰峪地区被 SN 向构造叠加,并保存了高压麻粒岩的地质记录,说明 SN 向走滑型构造带发育于高压麻粒岩带之后,即滦县－卢龙－双山子－迁安太古宙末期构造盆地形成之后.

综合上述变质作用、岩浆作用和构造变形特征,不难得出如下结论:冀东－辽西地区是在～2.9 Ga 或者更老地块基础上,经过 NNW-NW 向 SSE-SE 方向俯冲和逆冲推覆的热俯冲－碰撞造山带.即～2.61 Ga开始俯冲,到了 2.56～2.53 Ga 形成了阜新－朝阳到青龙－洒河桥－马兰峪地区大量变质拉斑玄武质火山岩和钙碱性变质火山岩,组合有副变质岩和 BIF 建造.俯冲板片前缘到达锦州－兴城(包括觉华岛)－界岭口一带,俯冲板片流体和熔体交代地幔楔,并导致地幔楔部分熔融,地幔楔岩浆与下地壳相互作用形成锦州－界岭口 DMG 岩石组合,并侵位于大陆下地壳,同时形成双山子－迁安－滦县－卢龙构造盆地基底(角度不整合之下)发育中新太古代各类花岗质片麻岩和钙碱性变质火山岩.～2.53～2.51 Ga 锦州－绥中－安子岭－迁安－三屯营－遵化南部地区进入到弧后伸展,岩石圈温度升高,岩石圈地幔和中下地壳热软化,形成锦州北－兴城－迁安－滦县－卢龙大型伸展变形带和该带内侵位于下地壳花岗质岩石的固态塑性底劈、岩浆底劈隆升.在这一过程中三屯营－太平寨地区发育紫苏石英闪长岩、紫苏花岗闪长岩－紫苏花岗岩岩浆侵位,并亚固底劈形成三屯营－太平寨卵型构造区.与伸展作用同时,在青龙－上营－洒河桥－马兰峪一线以南的弧后地区形成与俯冲相关联的 DTTG 花岗质岩石的侵位和分离结晶.由于北部俯冲板片的持续向下俯冲,锦州－青龙－上营－马兰峪以北地区火山弧和 TTG 片麻岩逆冲推覆和构造堆垛,地壳增厚.～2.51 Ga 开始,岛弧体和古老大陆地块碰撞增压作用,形成根部高压麻粒岩相变质作用,然后俯冲板片断离,上部大规模逆冲推覆导致高压麻粒岩带褶皱回返,形成 ITD 型 *P-T* 路径.然后由于俯冲板片断离,深部软流圈和软化的高温岩石圈上隆和局部熔融,导致岛弧和弧后盆地区伸展隆升,幔源岩浆的板底垫托,形成三屯营－太平寨地区高温麻粒岩相变质区的 HT-UHT 变质作用和 IBC 型 *PT* 路径.上部地壳～2.51～2.50 Ga 伸展形成双山子－迁安－滦县－卢龙构造盆地,并伴随少量幔源玄武质火山岩和相关的钙碱性火山岩喷发,形成司家营大型 BIF 建造.

关于高压麻粒岩的形成时代,根据目前笔者研究组发表的 73 个锆石定年样品变质年龄记录,最老的变质锆石年龄出现在～2.52 Ga,最老的变质年龄峰值为 2.496 Ga,第 2 个变质锆石年龄峰值出现在 2.475 Ga,此外还有～2.41 Ga、2.35 Ga 等多个次要峰值,表明主变质作用期发生在～2.50 Ga(图 5),并受到了后期其他流体、热事件改造.一些构成次要年龄峰的锆石多为岩浆锆石蜕晶质化后再重结晶的锆石,其中一些可能无明确的地质意义.但笔者的定年样品明显缺少与中部带类似的 2.1～1.8 Ga 古元古代末期变质作用的锆石年龄纪录.最近中科院地质与地球物理研究所刘鹏(2017)在马兰峪－挂兰峪地区发现～2.9 Ga 变质火山岩,恰好在高压麻粒岩带范围内,其所有定年样品依然只保存了～2.5 Ga 变质年龄记录.相似地 Zhang *et al*.(2012)报道了石人沟矿区表壳岩变质年龄也只有～2.5 Ga 一期变质记录.因为高温麻粒岩和高压麻粒岩带均形成于高角

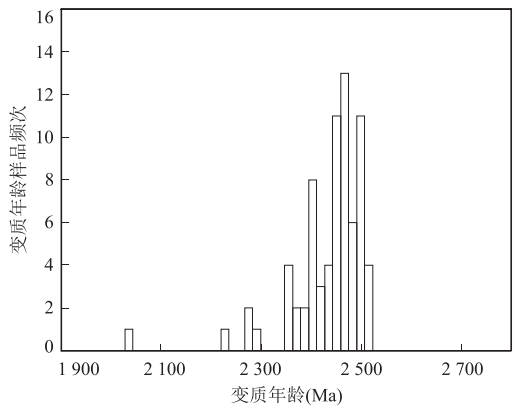

图 5 冀东－辽西地区锆石变质年龄统计直方图

Fig.5 A statistical histogram of metamorphic ages of zircons for dated samples from western Liaoning and eastern Hebei provinces

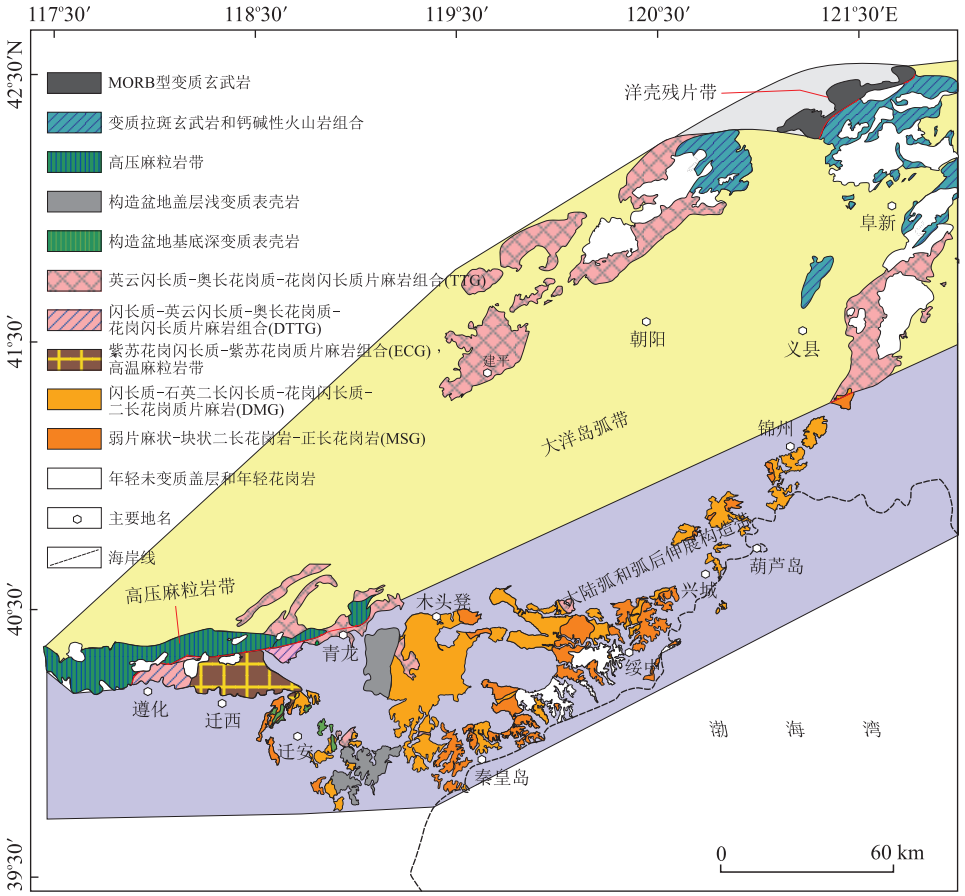

图 6　冀东辽西地区构造分区简图

Fig.6　Tectonic classification map of the eastern Hebei-western Liaoning Archean metamorphic basement range

闪岩相到麻粒岩相变质条件,锆石对其变质事件记录是灵敏的,正如图 5 所示.因此笔者将冀东地区高压麻粒岩带的主要变质作用事件定义为新太古代末—古元古代初期(图 5).同时笔者注意到最近关于冀东两期麻粒岩相变质作用、早期发生在～2 500 Ma和晚期发生在～1 800 Ma 的报道(Yang and Wei, 2017a, 2017b).然而,检查他们洒河桥和马兰峪两个高压麻粒岩样品的岩相学特征(图 2d, 2f; Yang and Wei, 2017a),没有两期麻粒岩相变质叠加的记录,笔者自己的样品也缺少两期麻粒岩相变质叠加的岩相学记录.他们的定年锆石清楚地记录了岩浆锆石的～2 500 Ma 变质生长边,具有低的 Th/U 比值,也有大量岩浆锆石发生了蜕晶质化并发生了重结晶,形成～2 500 Ma 的变质年龄,而年轻锆石年龄多为自形锆石,具有高的 Th/U 比值和类似于岩浆锆石的稀土图谱(Yang and Wei, 2017a, 2017b).位于青龙—迁安—滦县—卢龙构造盆地底部发育清楚的底砾岩,角度不整合于下伏高角闪岩相到麻粒岩相变质的钙碱性火山岩组合、TTG 片麻岩和卵型构造域各类岩石组合之上,其东北端直接覆盖在高压麻粒岩带和高温麻粒岩带之上.底砾岩之上为低绿片岩相变质的玄武岩和其他钙碱性火山岩(图 3).该火山岩定年获得 2 506～2 511 Ma、2 500～2 520 Ma 的锆石年龄(Lü *et al*., 2012; 郭荣荣等, 2014).说明高压麻粒岩带和三屯营—太平寨—安子岭中高级变质的卵型构造区在～2 500 Ma 前后已经出露到了地表,之后又接受沉积.

综上所述,高压麻粒岩带和高温麻粒岩带区域性变质与主要变形过程不晚于～2 500 Ma,因此笔者坚持认为高压麻粒岩相变质作用发生于～2 500 Ma.而 1.9～1.8 Ga 的锆石不具备与石榴石共生典型变质锆石的特征,可能与其他 2.47～2.30 Ga锆石年龄一样为后期热事件改造年龄,也可能受中部构造带变形变质作用影响,代表了局部变质、变形或者流体改造事件.

根据前述火成岩岩石组合填图结果,不难看出冀东—辽西太古代变质基底出露区存在明显岩石组合分带性,结合高压麻粒岩带和高温麻粒岩带分布特征和形成时代,笔者认为这一地区新太古代晚期

经历了北部的洋壳俯冲并形成大量的岛弧火山岩和深成 TTG 片麻岩侵入体的岛弧,该岛弧带经历了向南部的～2.9～3.4 Ga 古大陆俯冲并碰撞等动力学过程形成了南部的古陆上的钾质花岗岩带(图 6),总体上形成于莫霍面温度比现在高 100～150 ℃条件下板片热的俯冲－碰撞造山动力学背景.

致谢:感谢特邀主编魏春景教授以及彭澎研究员和另一名匿名评审者在百忙之中花许多时间评审本文,并提出宝贵的修改意见,使得本文质量得以提高!

References

Bai, X., Liu, S. W., Guo, R. R., et al., 2014. Zircon U-Pb-Hf Isotopes and Geochemistry of Neoarchean Dioritic-Trondhjemitic Gneisses, Eastern Hebei, North China Craton: Constraints on Petrogenesis and Tectonic Implications. *Precambrian Research*, 251: 1－20. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.05.027

Bai, X., Liu, S. W., Guo, R. R., et al., 2015. Zircon U-Pb-Hf Isotopes and Geochemistry of Two Contrasting Neoarchean Charnockitic Rock Series in Eastern Hebei, North China Craton: Implications for Petrogenesis and Tectonic Setting. *Precambrian Research*, 267: 72－93. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.06.004

Bai, X., Liu, S. W., Guo, R. R., et al., 2016. A Neoarchean Arc-Back-Arc System in Eastern Hebei, North China Craton: Constraints from Zircon U-Pb-Hf Isotopes and Geochemistry of Dioritic-Tonalitic-Trondhjemitic-Granodioritic (DTTG) Gneisses and Felsic Paragneisses. *Precambrian Research*, 273: 90－111. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.12.003

Brown, M., 2007. Metamorphic Conditions in Orogenic Belts: A Record of Secular Change. *International Geology Review*, 49(3): 193－234. https://doi.org/10.2747/0020-6814.49.3.193

Duan, Z. Z., Wei, C. J., Rehman, H. U., 2017. Metamorphic Evolution and Zircon Ages of Pelitic Granulites in Eastern Hebei, North China Craton: Insights into the Regional Archean *P-T-t* History. *Precambrian Research*, 292: 240－257. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.02.008

Fu, J. H., Liu, S. W., Chen, X., et al., 2016. Petrogenesis of Taxitic Dioritic-Tonalitic Gneisses and Neoarchean Crustal Growth in Eastern Hebei, North China Craton. *Precambrian Research*, 284: 64－87. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.08.002

Fu, J. H., Liu, S. W., Wang, M. J., et al., 2017. Late Neoarchean Monzogranitic-Syenogranitic Gneisses in the Eastern Hebei-Western Liaoning Province, North China Craton: Petrogenesis and Implications for Tectonic Setting. *Precambrian Research*, Online. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.05.002

Groppo, C., Rolfo, F., 2008. Counterclockwise *P-T* Evolution of the Aghil Range: Metamorphic Record of an Accretionary Melange between Kunlun and Karakorum (SW Sinkiang, China). *Lithos*, 105(3－4): 365－378. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.05.011

Guo, R. R., Liu, S. W., Bai, X., et al., 2014. Geochemistry and Zircon U-Pb Chronology of Shuangshanzi Group in the Eastern Hebei Province, North China Craton: Constraints on Petrogenesis and Tectonic Setting. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 2885－2904 (in Chinese with English abstract).

Guo, R. R., Liu, S. W., Bai, X., et al., 2017a. A Neoarchean Subduction Recorded by the Eastern Hebei Precambrian Basement, North China Craton: Geochemical Fingerprints from Metavolcanic Rocks of the Saheqiao-Shangying-Qinglong Supracrustal Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 135: 347－369. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.01.007

Guo, R. R., Liu, S. W., Gong, E. P., et al., 2017b. Arc-Generated Metavolcanic Rocks in the Anshan-Benxi Greenstone Belt, North China Craton: Constraints from Geochemistry and Zircon U-Pb-Hf Isotopic Systematics. *Precambrian Research*, Online. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.03.028

Guo, R. R., Liu, S. W., Santosh, M., et al., 2013. Geochemistry, Zircon U-Pb Geochronology and Lu-Hf Isotopes of Metavolcanics from Eastern Hebei Reveal Neoarchean Subduction Tectonics in the North China Craton. *Gondwana Research*, 24(2): 664－686. https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.12.025

Guo, R. R., Liu, S. W., Wyman, D., et al., 2015. Neoarchean Subduction: A Case Study of Arc Volcanic Rocks in Qinglong-Zhuzhangzi Area of the Eastern Hebei Province, North China Craton. *Precambrian Research*, 264: 36－62. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.04.007

Kwan, L. C. J., Zhao, G. C., Yin, C. Q., et al., 2016. Metamorphic *P-T* Path of Mafic Granulites from Eastern Hebei: Implications for the Neoarchean Tectonics of the Eastern Block, North China Craton. *Gondwana Research*, 37: 20－38. https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.05.004

Lindsley, D. H., Dixon, S. A., 1976. Diopside-Enstatite Equilibria at 850 ℃ to 1 400 ℃, 5 to 35 kb. *American Journal of Science*, 276(10): 1285－1301. https://doi.org/10.2475/ajs.276.10.1285

Liu, P., 2017. Mesoarchean to Neoarchean Crustal Evolution of the North China Craton—Case Studies for the Petrogenesis of the Plutonic and Volcanic Rocks in the Eastern and Northern Hebei (Dissertation). University of Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).

Liu, S. J., Wan, Y. S., Sun, H. Y., et al., 2013. Paleo- to Eoarchean Crustal Evolution in Eastern Hebei, North China Craton: New Evidence from SHRIMP U-Pb Dating and In-Situ Hf Isotopic Study of Detrital Zircons from Paragneisses. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78: 4—17. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.07.041

Liu, S. W., 1994. The Formative Conditions of TTG Gneisses. *Earth Science Frontiers*, 1(1—2): 151—157 (in Chinese with English abstract).

Liu, S. W., Lin, Q., 1992. Water Activities on Granulite Facies Metamorphism in the Qianxi-Zunhua Area, Eastern Hebei Province. *Scientia Geologica Sinica*, (Suppl.): 120—129 (in Chinese with English abstract).

Liu, S. W., Lin, Q., Cao, L., 1991. The *P-T-t* Trajectory Recorded by the Compositional Zonations of Amphibole in Eastern Hebei Province. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 21(2): 129—134, 142 (in Chinese with English abstract).

Liu, S. W., Santosh, M., Wang, W., et al., 2011. Zircon U-Pb Chronology of the Jianping Complex: Implications for the Precambrian Crustal Evolution History of the Northern Margin of North China Craton. *Gondwana Research*, 20(1): 48—63. https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.01.003

Liu, W. X., Yang, Z. S., Powell, D., et al., 1993. Three Early Archean Gneisses around Santunying of Qianxi, Eastern Hebei, China: Geochemistry and Petrogenesis. *Geological Review*, 39(3): 205—215 (in Chinese with English abstract).

Lü, B., Zhai, M. G., Li, T. S., et al., 2012. Zircon U-Pb Ages and Geochemistry of the Qinglong Volcano-Sedimentary Rock Series in Eastern Hebei: Implication for ~2 500 Ma Intra-Continental Rifting in the North China Craton. *Precambrian Research*, 208: 145—160. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.04.002

Nutman, A. P., Wan, Y. S., Du, L. L., et al., 2011. Multistage Late Neoarchaean Crustal Evolution of the North China Craton, Eastern Hebei. *Precambrian Research*, 189(1—2): 43—65. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.04.005

Wang, C., Song, S. G., Niu, Y. L., 2016. TTG and Potassic Granitoids in the Eastern North China Craton: Making Neoarchean Upper Continental Crust during Micro-Continental Collision and Post-Collisional Extension. *Journal of Petrology*, 57(9): 1775—1810.

Wang, W., Liu, S. W., Bai, X., et al., 2011. Geochemistry and Zircon U-Pb-Hf Isotopic Systematics of the Neoarchean Yixian-Fuxin Greenstone Belt, Northern Margin of the North China Craton: Implications for Petrogenesis and Tectonic Setting. *Gondwana Research*, 20(1): 64—81. https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.02.012

Wang, W., Liu, S. W., Bai, X., et al., 2015. Precambrian Geodynamics (Ⅷ): Late Archean Crustal Growth Models Recorded in the North China Craton. *Earth Science Frontiers*, 22(6): 109—124 (in Chinese with English abstract).

Wang, W., Liu, S. W., Santosh, M., et al., 2013. Zircon U-Pb-Hf Isotopes and Whole-Rock Geochemistry of Granitoid Gneisses in the Jianping Gneissic Terrane, Western Liaoning Province: Constraints on the Neoarchean Crustal Evolution of the North China Craton. *Precambrian Research*, 224: 184—221. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.09.019

Wang, W., Liu, S. W., Santosh, M., et al., 2015. Neoarchean Intra-Oceanic Arc System in the Western Liaoning Province: Implications for Early Precambrian Crustal Evolution in the Eastern Block of the North China Craton. *Earth-Science Reviews*, 150: 329—364. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.08.002

Wang, W., Liu, S. W., Wilde, S. A., et al., 2012. Petrogenesis and Geochronology of Precambrian Granitoid Gneisses in Western Liaoning Province: Constraints on Neoarchean to Early Paleoproterozoic Crustal Evolution of the North China Craton. *Precambrian Research*, 222—223: 290—311. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.10.023

Wilde, S. A., Valley, J. W., Kita, N. T., et al., 2008. SHRIMP U-Pb and CAMECA 1 280 Oxygen Isotope Results from Ancient Detrital Zircons in the Caozhuang Quartzite, Eastern Hebei, North China Craton: Evidence for Crustal Reworking 3.8 Ga Ago. *American Journal of Science*, 308(3): 185—199. https://doi.org/10.2475/03.2008.01

Xiong, L., Shi, W. J., Li, H., et al., 2017. Geochemistry, Sr-Nd-Hf Isotopes and Petrogenesis of Mid-Late Triassic Baizhangzi Granitic Intrusive Rocks in Eastern Hebei-Western Liaoning Province. *Earth Science*, 42(2): 207—222 (in Chinese with English abstract). https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.016

Yang, C., Wei, C. J., 2017a. Two Phases of Granulite Facies Metamorphism during Neoarchean and Paleoproterozoic in the East Hebei, North China Craton: Records from Mafic Granulites. *Precambrian Research*, 301: 49—64. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.09.005

Yang, C., Wei, C. J., 2017b. Ultrahigh Temperature (UHT) Mafic Granulites in the East Hebei, North China Craton: Constraints from a Comparison between Tempera-

tures Derived from REE-Based Thermometers and Major Element-Based Thermometers.*Gondwana Research*, 46:156-169.https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.02.017

Yang,J.H.,Wu,F.Y.,Wilde,S.A.,et al.,2008.Petrogenesis and Geodynamics of Late Archean Magmatism in Eastern Hebei,Eastern North China Craton:Geochronological,Geochemical and Nd-Hf Isotopic Evidence.*Precambrian Research*, 167: 125-149. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.07.004

Zhang,L.C.,Zhai,M.G.,Zhang,X.L.,et al.,2012.Formation Age and Tectonic Setting of the Shirengou Neoarchean Banded Iron Deposit in Eastern Hebei Province:Constraints from Geochemistry and SIMS Zircon U-Pb Dating. *Precambrian Research*, 222-223: 325-338. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.01.019

附中文参考文献

郭荣荣,刘树文,白翔,等,2014.冀东双山子群变质火山岩的地球化学、锆石 U-Pb 年代学及其对岩石成因和构造背景的制约.岩石学报,30(10): 2885-2904.

刘鹏, 2017.华北克拉通中-晚太古代地壳演化——冀东-冀北地区深成岩和变质火山岩的岩石地球化学研究(博士学位论文).北京:中国科学院大学.

刘树文,1994.TTG 片麻岩与地壳早期动力学.地学前缘,1(1-2): 151-157.

刘树文,林强,1992.冀东迁西-遵化地区麻粒岩相变质水活度的研究.地质科学,S1: 120-129.

刘树文,林强,曹林,1991.冀东角闪石成分环带记录的 *P-T-t* 轨迹.长春地质学院学报,21(2): 129-134, 142.

刘武旭,杨振升,Powell,D.,等,1993.冀东迁西三屯营地区早太古宙三组片麻岩的岩石地球化学及其成因.地质论评,39(3): 205-215.

王伟,刘树文,白翔,等,2015.前寒武纪地球动力学(Ⅷ):华北克拉通太古宙末期地壳生长方式.地学前缘,22(6): 109-124.

熊乐,石文杰,李欢,等, 2017.冀东-辽西中-晚三叠世柏杖子花岗质侵入岩地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素特征及岩石成因.地球科学,42(2): 207-222.

* *

《地球科学》荣获第四届中国出版政府奖提名奖

近日,中国地质大学(武汉)主办的期刊《地球科学》(中文版)荣获第四届中国出版政府奖提名奖.

根据《中国出版政府奖章程》的规定,国家新闻出版广电总局开展了第四届中国出版政府奖的评选表彰工作.经过认真评选,20 种期刊获期刊奖,39 种期刊获提名奖,获奖期刊均从全国上万种期刊中严格评选而来.

《地球科学》(中文版)1957 年创刊,是我国地球科学领域有影响力的综合性地学核心期刊.近年来在主管和主办单位的正确领导下,在主编和编委团队以及广大专家学者的关心和支持下,该刊采取"瞻前顾后抓选题,通天彻地抓队伍"的办刊方略,影响力不断提升,已连续荣获全国百强科技期刊、湖北出版政府奖、中国最具国际影响力学术期刊等奖项,2005 年以来一直被 EI 数据库 100%收录,为推动我国地学科技发展、促进地学国内外学术交流做出了积极贡献.