

早期碰撞造山带的构造样式及其板块构造演化意义： 以华北克拉通五台山花岗岩—绿岩区为例*

李江海 刘守偈 牛向龙 高危言

LI JiangHai, LIU ShouJie, NIU XiangLong and GAO WeiYan

教育部造山带与地壳演化重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

Key Laboratory of Orogenic Belt and Crustal Evolution, MOE, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2009-01-08 收稿, 2009-01-14 改回.

LI JH, LIU SJ, NIU XL and GAO WY. 2009. Tectonic pattern of Early Precambrian collisional belt and its plate tectonic implication: A case study of Wutaishan granite-greenstone belt, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3):481–494

Abstract The kinematics of Early Precambrian collisional belt has been the target topics for plate tectonics. Wutaishan granite-greenstone belt (WGGB) is a key area to understand early collisional belt. Because of its large elevation difference, continuous and widespread rock outcrops, the Wutaishan area has been widely investigated, and represents one of the most important windows to understand early crustal evolution. Based on the widespread geological research and the structural analysis of across section, WGGB is divided into two distinct tectonic levels, i. e. upper tectonic level composed of cover sequence (Dongye Subgroup) with open synclines and lower tectonic level consisting of orogenic complex, foreland basin and fold-thrust belt. As indicated by the distribution of metamorphic facies and fold hinges of main phase, WGGB is tilted to the southwest, a complete section across the different units of collisional belt have been exposed with shallow to middle crustal levels. The foreland basin is characterized by large-scale recumbent folds and thrusts, structural emplacement of ophiolitic mélanges and reactivation of cratonic basement. Whereas, the orogenic complex is associated with lower-angle thrust fault and complicate interference folds, accompanied by the emplacement of TTG-granite gneiss. From the shallow to middle level of the orogenic belt, folded greenstone belts were gradually replaced by tectonic packages of supracrustal sequence interleaved with TTG gneiss. Compared with other Archean granite-greenstone belts of the world, the tectonic pattern and foreland basin molass sequence of WGGB record intense crustal shortening and uplifting associated with collisional orogeny, which is important example for reconstruction of the Early Precambrian plate tectonic evolution of continent.

Key words Neoproterozoic; Greenstone belt; Foreland basin; Interference folds; Structural deformation; Collision; Wutaishan

摘要 早期碰撞造山带的研究是探索板块构造早期体制的前缘领域。五台山地貌高差巨大(达2437m)、山体雄伟、地质露头连续完整,是我国早前寒武纪地质研究的经典地区和认识大陆克拉通早期地壳演化的窗口,已成为世界早前寒武纪碰撞造山带的典型实例。围绕五台山构造样式的深入研究,对于揭示早期板块构造演化及中浅地壳构造层次具有重要的地质意义。大量的野外地质调查及构造横剖面研究表明,五台山东冶亚群为华北克拉通的早期沉积盖层,它以开闭复式向形为特征,不整合于造山杂岩及其前陆冲断带和前陆盆地之上。区域变质相的分布及豆村亚群中期褶皱枢纽指示,五台山花岗岩—绿岩区向西南掀斜,出露了新太古代碰撞造山带不同构造单元(造山杂岩及前陆冲断带和前陆盆地)中浅层次上连续而完整的构造剖面。前陆冲断带以沉积岩系大规模平卧褶皱和逆断层、蛇绿岩混杂带和基底构造活化为特征。造山杂岩发育低角度逆断层和复杂叠加褶皱,伴随不同时期花岗岩类的侵位。从浅部层次向深部,绿岩带复式褶皱逐渐被与TTG杂岩构造叠置的表壳岩构造岩片取代,构造面理由陡立趋于平缓。与世界其他花岗岩—绿岩区相比,五台山区完好保留了造山带挤压构造及其前陆盆地沉积,指示早期碰撞造山过程的强烈构造缩短和大规模地壳隆升作用,是研究早期板块碰撞造山过程的重要例证。

关键词 新太古代; 绿岩带; 前陆盆地; 叠加褶皱; 构造变形; 碰撞作用; 五台山

中图法分类号 P541

* 本文受国家自然科学基金项目(40472097)资助。

第一作者简介: 李江海, 男, 1965年生, 博士, 教授, 构造地质学与前寒武纪地质学专业, E-mail: jhli@pku.edu.cn

1 引言

地球早期板块构造体制开始出现的时间及其早期大地构造演化,是大陆地质学研究的重大科学问题之一。由于复杂漫长的地质演化历史、多期构造热事件及构造变形的叠加改造,以及晚期大幅度的抬升作用造成浅层次构造的剥蚀,在对大陆克拉通基底成因及其早期构造演化历史的认识上,常具有多解性和构造歧义的解释。

由于早期地壳地温梯度较高,中下地壳层次强烈构造变形,构造演化规律难于认识。事实上,世界不同地区的研究表明,变质岩区大尺度地质构造的研究,特别是碰撞造山构造的识别,对于早期板块聚敛边界的准确鉴别,具有重要价值。早前寒武纪碰撞造山带的重要的特征地质单元包括:1)早期洋壳地质记录(蛇绿岩套、豆荚状铬铁矿、BIF),记录了洋盆演化及其关闭过程(李继亮等,1990;王凯怡等,1997;Kusky and Li,2003;Kusky *et al.*,2004,2007;Li *et al.*,2002,2004;李江海等,2002);2)高压/高温麻粒岩(Santosh *et al.*,2007;刘守偈和李江海,2007;Guo *et al.*,2005),记录陆壳俯冲碰撞加厚/异常高热流活动;3)前陆盆地—磨拉石盆地沉积,记录巨大地貌高差背景、陆壳隆升和沉积盆地挠曲沉降(李江海等,2006a,b,c;Li and Kusky,2007)。4)大规模褶皱—逆冲推覆体和低角度韧性剪切带,记录碰撞作用相关的地壳水平缩短和构造加厚(白瑾,1986;白瑾等,1992;田永清,1991;李江海等,2004a,b,2006a,b,c)。

在以将今论古思路指导下,探索早期板块构造的同时,深入解剖典型的早期变质岩区构造样式,对于制约同位素年龄、地球化学数据的地质含义认识和建立区域构造演化模式具有指导意义。尽管近年来五台山早期碰撞造山带地质演化模式不断涌现(Kusky and Li,2003;Wang *et al.*,2004;Kröner *et al.*,2005;Polat *et al.*,2005;Wilde *et al.*,2005;Zhao *et al.*,2005;Trap *et al.*,2007,2008;李江海等,2006a),但更多是基于地质路线上的岩石地球化学、同位素地质年龄研究,或者区域构造格局的初步分析,加强五台山区腹地深入的野外地质观察和构造分析,无疑对完善地质构造演化模式具有积极的科学意义。

20世纪90年以来,五台山及其邻区获得大批高精度锆石 U-Pb 同位素年龄(白瑾等,1992;王汝铮等,1997;Wang *et al.*1996;Wilde *et al.*,1997,1998,2005;李江海等,2001;Kröner *et al.*,2005)。如何合理认识这些年龄数据相关的构造热事件含义,需要结合野外地质、综合不同层次构造,特别是加强中浅层次构造作用的深入研究。本文在对五台山区长期野外构造研究的基础上(李江海等,2001,2004a,b,2006a,b,c;Li and Kusky,2007),探讨早期碰撞造山带构造样式及其地壳演化意义,重点探讨前陆盆地与褶皱冲断作用两方面的地质问题。

2 五台山变质岩区的区域地质背景

五台山与恒山、太行山、吕梁山连续延绵,共同构成华北克拉通腹地最大面积(约10万 km^2)、完整的新太古代—古元古代(2600Ma到>1800Ma)变质基底露头区。五台山变质区为山西断隆构造掀斜出露的产物,区域上北邻内蒙古-冀东巨型古元古代—新太古代麻粒岩相带,向西南隐伏于鄂尔多斯克拉通陆块之下(李江海等,2006a,b,c)。由于后期构造扰动较弱,五台山区完整保留新太古代—古元古代中浅地壳层次的构造样式,五台绿岩带发育不同尺度的叠加褶皱,特别是早前寒武纪变质岩区非常罕见的巨型复式向斜和平卧褶皱。本区新太古代—古元古代沉积地层齐全,不同变质相空间上连续变化,变质相与构造地层线地质关系清楚保留,成为研究早期碰撞造山带的中浅地壳层次的天然实验室。新生代以来五台山—太行山大幅度抬升,造成巨大的地貌高差(五台山最大高差可达2437m)和纵横发育的沟谷,为三维上调查大陆克拉通基底构造,创造了理想的地形穿越条件及其地质剖面。

在区域构造上,五台山新太古代绿岩带以复式向形或构造岩片出现于恒山北部与北太行花岗质片麻岩—麻粒岩穹隆之间。主要的区域构造边界包括:陡倾斜的朱家坊剪切带和缓倾斜的龙泉关剪切带,它们分别以右旋走滑变形和逆冲变形为特征(图1)(李江海等,2001,2004b)。五台绿岩带以北东向为主的构造线与阜平轴向近东西-北西向的片麻岩穹隆构造线明显不协调,并以龙泉关低角度逆冲剪切带分隔。阜平片麻岩穹隆受龙泉关剪切带改造,向西构造置换逐渐增强,呈向西撒开的指状褶皱和“单斜”构造样式。五台绿岩带变质相的分布上具有向西南掀斜的向形特征(白瑾等,1996)。

五台山变质岩区沉积盖层为古元古代—中元古代—古生代沉积为主,主要保存于五台山西南部。古元古代地层下部主要为东冶亚群碳酸盐-泥质沉积岩,沉积于裂谷-克拉通盆地(表1)(李江海等,2006a);上部为郭家寨亚群磨拉石,沉积于小型山间断陷盆地;它们还被长城系地层不整合覆盖。本文将五台山变质岩系划分为新太古代造山带杂岩(五台绿岩带、TTG杂岩及花岗岩)、前陆盆地—褶皱冲断带(主要为高凡亚群复理石沉积、豆村亚群浅海碎屑沉积)及阜平杂岩和被动陆缘沉积等构造单元(表1)。五台造山带杂岩及其前陆盆地被两期基性岩墙群(2.20Ga,1.80Ga)侵位(内部资料),五台山造山带还被古元古代非造山杂岩侵位(大洼梁花岗岩锆石 U-Pb 2176+12Ma、王家会花岗岩锆石 U-Pb 2100Ma,凤凰山花岗岩 1.78Ga)(Wilde *et al.*,1997;王凯怡和Wilde,2002),记录古元古代裂谷作用。

造山带杂岩主体由中浅变质火山岩、变质沉积岩和花岗质片麻岩组成。造山带向东南逆冲扩展,蛇绿混杂岩构造侵位(Polat *et al.*,2005),并伴随新太古代末期花岗岩侵位

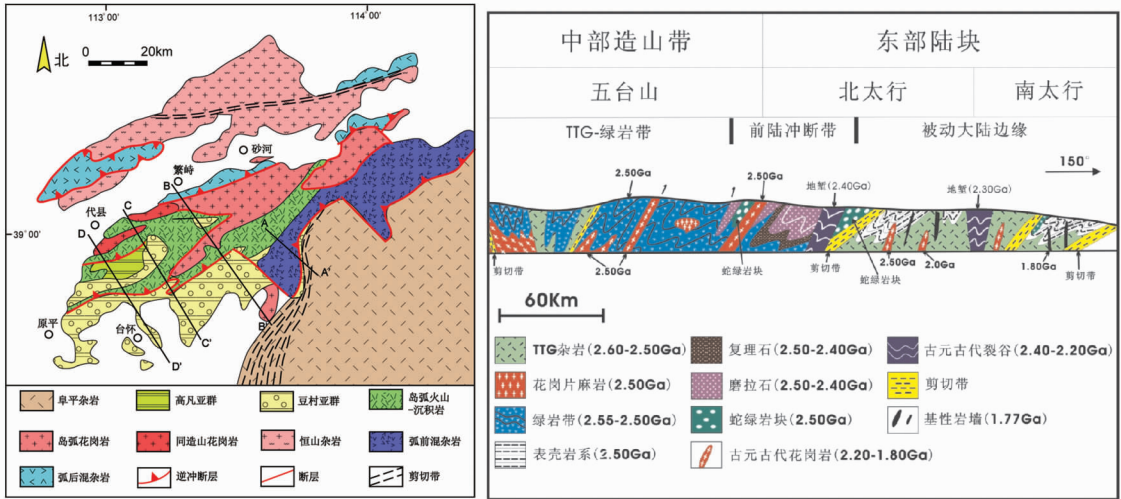


图1 五台山—恒山变质岩区构造格架图

Fig.1 The Early Precambrian tectonic map of Wutai Mt., North China Craton

表1 五台山区地层结构及基底构造划分

Table 1 Stratigraphic division of Precambrian geology of Wutai Mt.

	长城系-蓟县系 (1.80 ~ 1.0Ga)	坳拉谷-克拉通盆地沉积,并不整合于造山带杂岩和古元古代地层上	
沉积盖层	郭家寨亚群 (1.90Ga)	代表晚期磨拉石,沉积于山间沉积盆地,并且不整合于东冶亚群上	
	东冶亚群 (2.50 ~ 2.10Ga)	沉积于裂谷-克拉通盆地,并且不整合于豆村亚群和五台杂岩上,其青石村组基性火山岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 2450 ± 10Ma(王汝铮等,1997)	
	造山带杂岩由五台绿岩带及 TTG-花岗岩杂岩 (> 2.50Ga) 组成。峨口花岗岩 (同构造) 锆石同位素年龄为 2529 ± 10Ma (Wilde <i>et al.</i> , 1997)	前陆盆地及前陆冲断带由高凡亚群、豆村亚群组成。高凡亚群凝灰质岩及侵入高凡亚群中辉长岩的锆石 SHRIMP 年龄均为 2528 ± 6Ma(王凯怡等,1997)	东部陆块边缘由兰芝山花岗岩、阜平杂岩及被动陆缘沉积组成
变质基底	绿岩带绿片岩相-角闪岩相变质,原岩形成于岛弧-弧前-弧后,并被高凡亚群(2.50Ga)不整合覆盖	被东冶亚群不整合覆盖,高凡亚群复理石不整合于五台杂岩上,前陆盆地地层以绿片岩相为主。从西北部的高凡亚群到东南部的豆村亚群,地层底部不整合面由西北向东南逐渐抬高,向前陆地超覆,豆村亚群沉积中心整体向东南迁移	基底杂岩经历强烈改造作用,并被前陆盆地豆村亚群碎屑沉积超覆

(白瑾等,1996; 李继亮等,1990; 王凯怡等,1997)。大量锆石 U-Pb 年龄分析表明,造山带的花岗-绿岩带形成于 2600 ~ 2500Ma, 涉及活动陆缘俯冲-碰撞造山过程(田永清,1991; Kröner *et al.*, 2005)。在造山带杂岩东南部保留大规模的前陆冲断带及前陆盆地(Li and Kusky, 2007), 其下部的复理石建造(高凡亚群)千枚岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 2517 ± 32Ma(沈保丰和毛德宝, 2003); 高凡亚群凝灰质岩及侵入高凡亚群中辉长岩的锆石 SHRIMP 年龄均为 2528 ± 6Ma(王凯怡等, 2000)。

五台前陆盆地呈带状出现于五台山西南部,以复式向斜及冲断带为主要构造样式。盆地西北侧被五台造山杂岩所逆掩(图 1)。由北西向东南出露的地层依次变年轻。由下

到上,前陆盆地地层包括高凡亚群和豆村亚群。高凡亚群(次绿片岩相)为浊积岩—硅质岩,以平缓的产状不整合覆盖于五台绿岩带(强烈褶皱、产状陡立)之上。豆村亚群(弱变质—未变质)为粗碎屑磨拉石建造、碎屑岩、泥质岩及碳酸盐岩组成(图 2)。

高凡亚群以次绿片岩相具鲍马序列沉积特征的陆缘碎屑岩为主,厚度约 1500m,一般划分为张仙堡组和磨河组;高凡亚群不整合在五台绿岩带之上,其上被豆村亚群角度不整合沉积覆盖(图 2)。高凡亚群以千枚岩、绢英片岩、变粉砂岩为主,夹石英岩、碳质片岩及少量凝灰岩。底部为石英粗砂岩(局部含砾石),向上出现硬砂岩、页岩、炭质页岩构成的 5 个明显的沉积旋回(徐朝雷, 1990)。沉积构造广泛保

















亚群	组	厚度 (m)	柱状图	岩性特征	沉积构造
长城系				白色石英砂岩 <i>角度不整合</i>	波痕、交错层
郭家寨亚群	雕王山组	200		上部以变质砾岩为主; 中部以石英岩或变质砂岩为主; 下部以板岩、千枚岩为主, 常发育底砾岩	交错层 巨型斜层理 波痕泥裂
	黑山贝组	290			
	西河里组	240			
东冶亚群	天蓬隘组	>800		主要为千枚岩夹结晶白云岩, 上部夹串珠状, 条带状大理岩 <i>角度不整合</i>	干缩串珠状构造
	北大兴组	1000-1400		主要为白云岩, 底部有一层100-300m厚的板岩夹白云岩	竹叶状构造 燧石条带构造
	槐荫村组	470			
	大关山组	975		主要为千枚岩夹结晶白云岩, 向上白云岩增多, 至上部以白云岩为主	鲕状构造 交错层波痕 磁铁矿条纹 冲刷构造
	建安村组	760			
	河边村组	770-810		以白云岩为主, 下部有少量石英岩、板岩, 顶部夹一层变基性火山岩	杏仁、气孔构造 交错层 波痕
	纹山组	310		下部石英岩; 中部板岩; 上部白云岩 <i>沉积间断</i>	交错层、波痕
	青石村组	>1000		以千枚层、砂质千枚层为主, 上部出现变基性火山岩 <i>沉积间断</i>	气孔、杏仁构造 鲕状构造
豆村亚群	大石岭组	270-1070		由下部石英岩、中部板岩, 上部白云岩三套地层组成, 底部往往有变质砾岩 <i>沉积间断</i>	燧石条带 食盐假晶 泥裂 交错层、波痕
	南台组	670		下部以石英岩为主, 上部为千枚岩夹石英大理岩 <i>沉积间断</i>	波状交错层
	四集庄组	90-2230		以变质砾岩为主; 上部为不厚的石英岩; 顶部为板岩-千枚岩 <i>角度不整合</i>	
五台群高凡亚群				千枚岩交变质粉砂岩、石英岩 <i>角度不整合</i>	包卷层理

图2 溇沱群综合地层柱状图

Fig.2 Stratigraphic column of Paleoproterozoic Hutuo Group, Wutai Mt.

留,如粒序层理、交错层、包卷层理、波痕等(图3),为典型近源海相浊积岩系。高凡亚群泥质岩显示明显的Eu负异常,指示源区开始出现大量花岗质成分,明显区别于五台绿岩带地层非陆源沉积的产物。

豆村亚群由下向上依次划分为四集庄组、南台组和大石岭组(图2,图3),所出露的各组地层向东南依次变新。豆村亚群不整合超覆于五台杂岩、高凡亚群及被动陆缘沉积上。豆村亚群被东冶亚群(2.45~1.90Ga)不整合覆盖,形成时代早于2.45Ga。繁峙县岩头村西北,豆村亚群变质砾岩不整合于强烈褶皱的五台绿岩带之上(甘泉不整合)。豆村亚群大石岭组不整合于兰芝山花岗岩之上,表明前陆盆地沉积上覆于前陆冲断构造带或基底构造活化带。

由北西向南东,前陆盆地地层底部不整合面逐渐抬高,向前陆方向超覆。依次为高凡亚群不整合于五台绿岩带上,

豆村亚群四集庄组砾岩不整合于五台绿岩带和高凡亚群上,豆村亚群大石岭组不整合于新太古代花岗岩片麻岩基底上等,大石岭组还超覆于南台组上。高凡亚群、豆村亚群的四集庄组、南台组、大石岭组的沉积中心向南东依次迁移。前陆盆地沉积中心向东南的相对迁移及超覆,记录了造山带扩展过程中逆冲载荷对西侧被动陆缘的不断改造和逆掩(Li and Kusky, 2007)。

造山带杂岩被高凡亚群底部的洪寺不整合(2.50Ga)覆盖(图3),表明早期构造变形时代早于2.50Ga。豆村亚群相对于高凡亚群整体向东南迁移,豆村亚群由下到上的各组地层(四集庄组、南台组、大石岭组)向东南依次超覆,记录前陆盆地的构造迁移过程。四集庄组砾岩出现于盆地西北侧,向南东相变为含砾砂岩、砂岩,表明盆地物源来源于西北部的五台杂岩(苗培森等,1999)。四集庄组见到花岗质糜棱岩砾

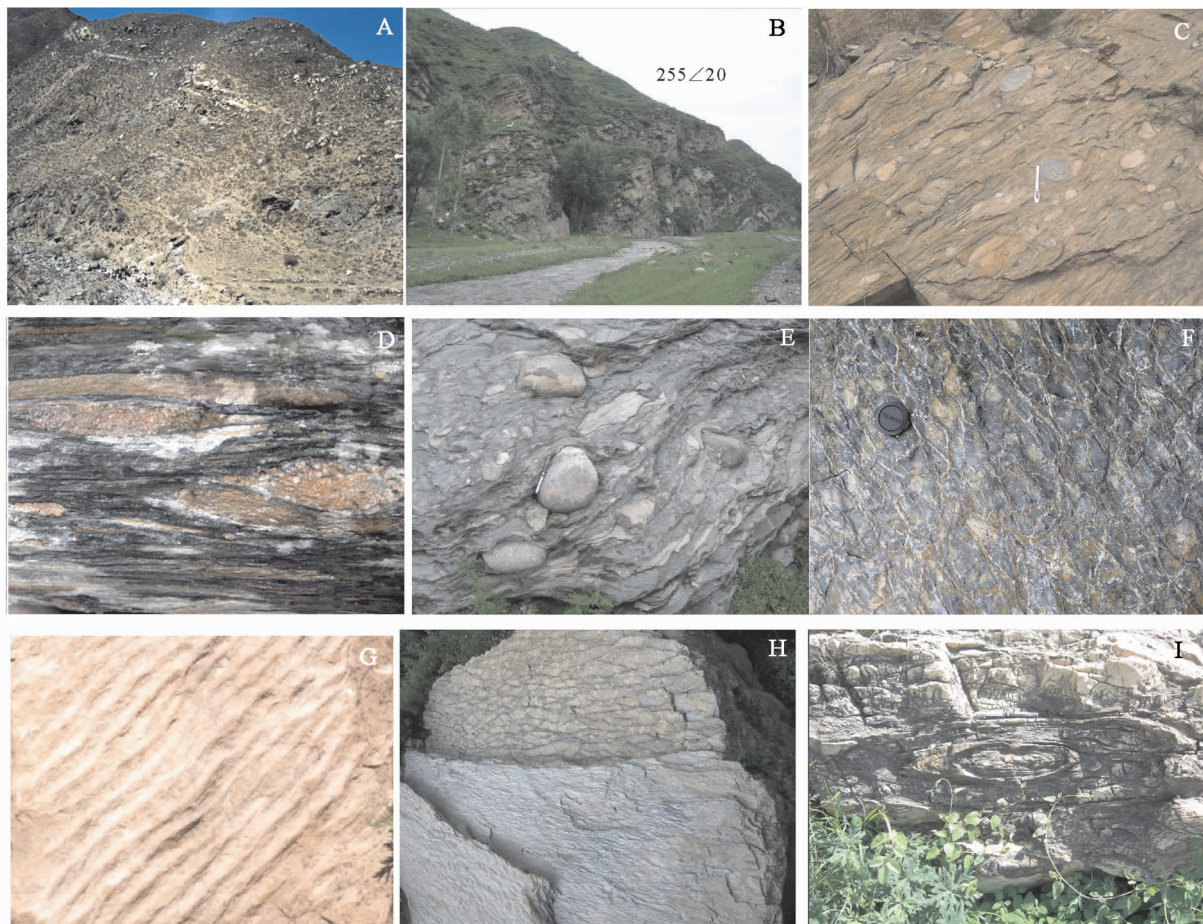


图3 五台山区前陆盆地主要地层单元的沉积构造野外照片

A-高凡亚群不整合于五台绿岩带上(代县洪寺); B-板峪口组不整合于阜平片麻岩上,铁堡不整合(五台县铁堡); C、D、E-豆村亚群四集庄组砾岩(五台县香峪); F、G-大石岭组泥岩泥裂、波痕;(五台县普庵寺); H、I-东冶亚群波痕及叠层石(五台县)

Fig. 3 Field photos showing sedimentary structures of foreland basin, Wutai Mt.

A- Unconformity of Gaofan Subgroup covering Wutai greenstone belt (Hongsi, Daixian); B- Unconformity of Banyukou Formation covering Fuping gneisses, Tiejie unconformity (Tiejie, Wutai); C, D, E- Conglomerate of Sijizhuang Formation, Doucun Subgroup (Xiangyu, Wutai); F, G- Mudcracks and ripples in mudstone of Dashiling Formation (Puansi, Wutai); H, I- Ripples and stromatolite of Dongye Subgroup (Wutai)

石(图3D)以及磁铁石英岩褶皱的砾石,说明该韧性变形早于四集庄组沉积之前。南台组石英岩-千枚岩-大理岩出现于四集庄组南部,记录盆地向东南的超覆作用。南台组与四集庄组之间出现沉积间断,记录造山隆升事件,造山带向前陆地区构造扩展。大石岭组先后超覆于兰芝山花岗岩、五台绿岩(金刚库组、海会庵)、龙泉关眼球片麻岩(铁堡)及阜平片麻岩(大川)上。上述不整合面及其超覆事件对应于造山带构造扩展事件。

3 造山带杂岩及其前陆冲断带的主要构造样式及构造变形

五台山区主要的构造单元具有不同的构造样式: 1) 五台绿岩带以叠加褶皱及构造岩片叠置为特征; 在地质图上(图1), 五台绿岩带构成一个大规模的复式向形褶皱, 在平

面上显示“之”字形, 褶皱形迹由绢云石英片岩和 BIF 构成, 并且一些大型的早期韧性剪切带也被叠加变形形成重褶皱。2) 花岗片麻岩区(TTG)以片麻岩穹隆(北台片麻岩)、花岗岩底辟(王家会花岗岩)、逆冲构造岩片(峨口花岗岩)等为特征。3) 前陆冲断构造带以大规模平卧褶皱及逆冲断层为主, 主要位于五台绿岩带-花岗岩区与前陆盆地之间。

造山杂岩代表性的构造变形域包括: 1) 峨口花岗岩逆冲席体; 2) 甘泉—岩头绿岩带复向形; 3) 金刚库构造岩片等。代表性的构造剖面有峨口—岩头—辛庄剖面、东山底村—伯强—鸿门岩—台怀两条北东向剖面等。

3.1 峨口花岗岩逆冲席体

在峨口—岩头—李家庄的造山杂岩构造剖面上, 峨口花岗岩(同位素年龄 $2555 \pm 6\text{Ma}$, Wilde *et al.*, 2005) 由北向南逆掩于五台绿岩带上。该花岗岩在岩头附近与绿岩带(石榴

蓝晶石片岩、绿片岩)构造叠置,岩体边缘侵入的基性岩脉被水平构造叠置并平行化,花岗片麻岩构造置换形成平缓的构造面理和紧闭褶皱、逆冲推覆体。峨口花岗岩与五台绿岩带构造叠置,侵入峨口花岗片麻岩内的基性岩墙(斜长角闪岩)被构造置换产状变平缓,局部形成紧闭褶皱,花岗岩被糜棱岩化(图4A、B)。

3.2 甘泉一岩头绿岩带复向形

在羊坪附近,五台绿岩含铁岩系呈封闭的重褶皱复向形分布,构成向西突出的马蹄形,形成五台山规模最大的铁矿床,在构造上为向西北倾倒的不对称褶皱,紧闭程度中等,褶皱短翼常伴倾向东南的逆冲断层,为晚期褶皱作用下由东南方向滑脱而来的推覆体,以铁矿层作为标志,估算其断距大约在15m左右(田永清,1991)。在露头上,磁铁矿石岩保留了丰富的叠加褶皱,造成转折端增厚,并形成富集的铁矿带(图4F)。

甘泉一岩头一带处于五台山绿岩带巨型复向形重褶皱转折部位,早期大规模平卧褶皱常被后期直立褶皱叠加改造,并形成重褶皱(图4C、D、E、G、H)。在岩头附近,叠加褶皱发育,早期为大型平卧褶皱,晚期为直立尖棱褶皱(图4C)。重褶皱中常保留早期褶皱形态,早期褶皱在晚期褶皱翼部显得更加紧闭,而在转折端则表现得更为宽阔。重褶皱层被一些片理化带所分隔而相间排列,沿强应变带常出现石英脉。在代县庵头一圭峰寺剖面上,五台绿岩带(石榴黑云母变粒岩)形成大型平卧褶皱,并被后期轴面直立褶皱叠加。在塔儿坪—辛庄形成大规模复式向形。早期大规模平卧褶皱被晚期轴面直立的紧闭(尖棱褶皱)-闭合褶皱叠加,形成尖棱状片理褶皱,使地壳发生强烈增厚。

在弱变形域,绿岩带的变基性岩系常保留岩浆岩结构构造(气孔-杏仁、斑状结构、火山沉积韵律、辉绿结构等)(图5A、B、C、D)。在繁峙县鱼鳞沟、宝石、五台县东台沟等地的绿片岩、绿帘角闪岩保留杏仁构造。在康家沟一塔儿坪变基性岩完整保留枕状构造,岩枕压扁,具有隐晶边缘,枕间为火山碎屑充填物,已识别出30余个岩枕。枕状玄武岩层之间可以识别出多层的BIF。向下变为层状玄武岩及辉绿岩岩脉,记录海底火山喷发过程。在岩头北绿岩带内保留多条变基性岩墙。而在繁峙县庵头一圭峰寺,枕状熔岩受强烈挤压发生面理置换,成为斜长角闪岩、石榴角闪石岩或绿片岩,仅在弱应变域保留枕状构造(图5B、C)。

3.3 神堂堡—金刚库蛇绿岩混杂带

该混杂带长100km,宽2~10km,北北东向展布,构造带内广泛出现蛇绿岩残片(白瑾等,1992;王凯怡等,1997;Li and Kusky,2007),至少识别出了130余个超镁铁质构造岩块。它们向北西倾斜,倾角20°~50°,成群分布,多为构造透镜体,产状受控于剪切带,产状与围岩面理一致。蛇绿岩块构造侵位于被动陆缘的板峪口组滨海相沉积砂岩上,并与金

刚库混杂岩带构造叠置。

蛇绿岩块由方辉橄榄岩、纯橄岩、铬铁矿、蛇纹岩、层状镁铁-层状超镁铁质岩(橄榄岩、辉石岩、角闪石岩、橄辉岩等)、变辉长岩、席状岩墙杂岩、枕状熔岩及硅质岩和磁铁矿石英岩组成。超镁铁岩块边缘经历强烈剪切变形,形成外侧片岩带。围岩为被动陆缘变沉积岩(大理岩、石英岩等),不同岩类构造叠置并经历复杂褶皱。有的超镁铁岩块换形成紧闭褶皱。以上蛇绿岩块以五台县李福沟李福沟超镁铁岩块群(纯橄岩、高镁橄橄岩)为代表(图5E),由70个岩块组成,与围岩构造接触,斜长角闪岩围岩发生强烈剪切变形。有的岩块在平面上呈重褶皱构造形态,有的岩块内部辉石岩脉显示复杂的紧闭褶皱及高温变形面理(橄榄石矿物条带),记录强烈构造变形。岩石富镁成分,具有大洋地幔构造岩、堆积岩特点(Polat, *et al.*, 2005)。蛇绿岩套被强烈构造肢解并发生复杂构造变形(图4I,图5E),记录碰撞造山期间强烈逆冲构造运动。蛇绿岩混杂带上盘还常出现呈紧闭向形保存的磨拉石沉积。蛇绿岩混杂带侵位于被动陆缘沉积地层上,记录洋盆闭合及板块碰撞过程。

综上所述,绿岩带构造形迹至少记录3期构造变形。D1表现为绿岩带形成大型平卧褶皱,绿岩带与花岗片麻岩之间出现大规模水平韧性剪切带、发生构造叠置,记录近水平构造缩短。D2表现为绿岩带大规模平卧褶皱又被叠加直立褶皱变形。为此,五台山早期绿岩带与花岗片麻岩之间的近水平的韧性剪切带被褶皱为复式向形,在复向形部位,早期平卧褶皱被轴面直立的褶皱叠加变形,记录早期大规模的近水平构造冲断变形和地壳加厚。

3.4 TTG-花岗片麻岩穹隆

2.55~2.53Ga为恒山-五台山TTG-花岗质片麻岩形成并侵位的高峰期(牛向龙和李江海,2006),主要形成于岛弧岩浆活动到陆块碰撞造山演化过程。依据花岗片麻岩体与绿岩带构造关系,五台山区花岗岩可以划分为以下三种类型:活化基底片麻岩、片麻岩穹隆、底辟花岗岩。石佛花岗岩为前陆基底构造活化的产物,并与前陆冲断带的豆村亚群沉积构造叠置。北台TTG-重熔花岗质片麻岩以穹隆构造为特征,伴随伸展剪切带及重熔作用。花岗岩底辟体主要为王家会花岗岩。

花岗片麻岩受剪切变形常形成不同尺度的韧性剪切带,发育构造透镜体、眼球片麻岩和糜棱岩为特征。剪切带面理构造置换强烈,长英质条带形成不对称小褶皱,强变形时形成成分条带、眼球状-糜棱状面理构造,其中的基性岩脉剪切形成构造透镜体。韧性剪切带常见于花岗片麻岩及花岗岩体边缘;如光明寺花岗岩边缘常发育小型韧性剪切带及不均匀的片理化。

五台花岗片麻岩向西南呈楔形尖灭,而向东北部渐变宽,成为穹隆状花岗片麻岩体。在剖面上花岗岩向东南逆冲于绿岩带之上或构造叠置,指示强烈的陆壳加厚作用。地质

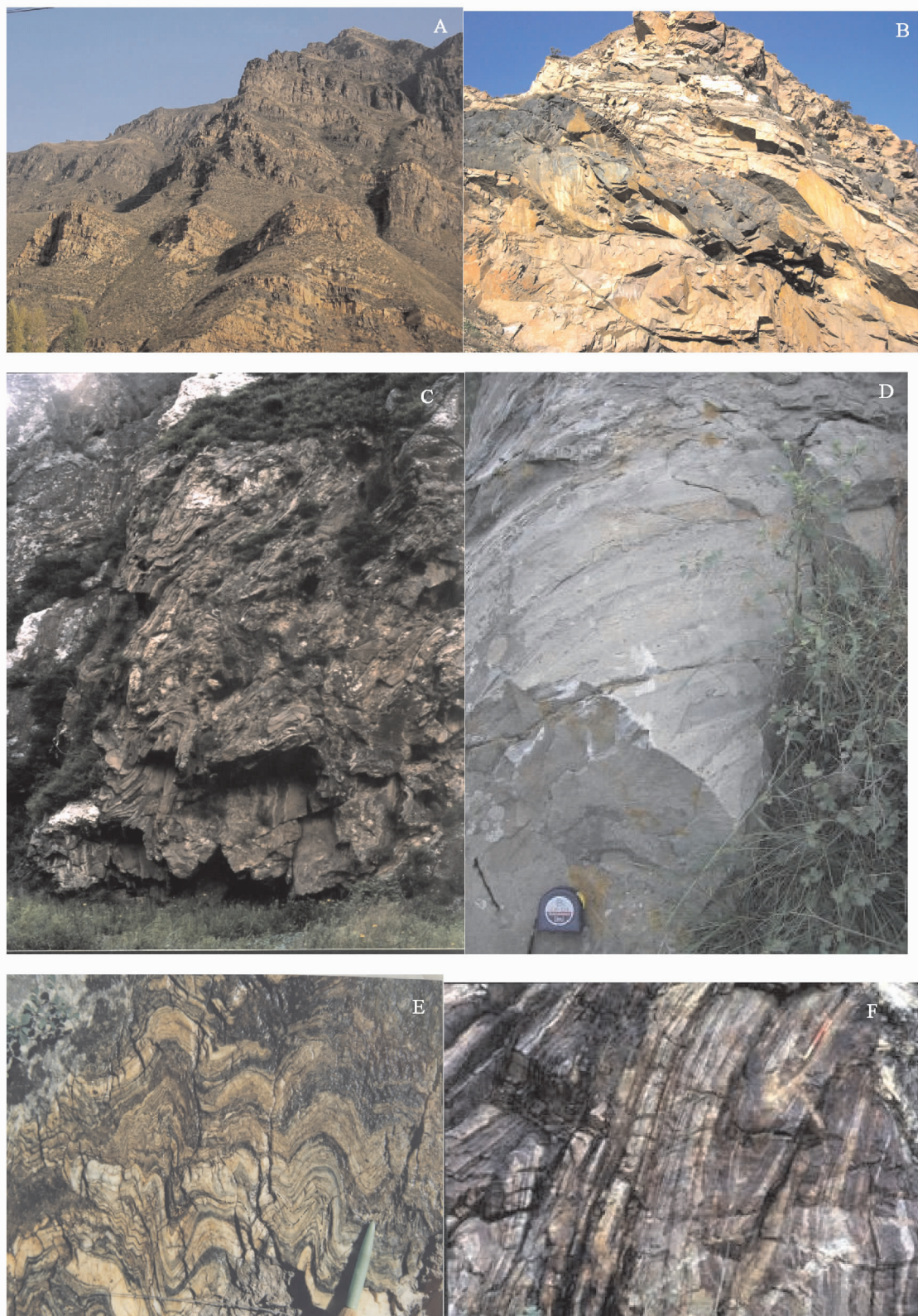




图4 五台绿岩带及其前陆盆地的褶皱及面理构造

A、B-侵入其中基性岩墙被水平构造叠置并面理化(代县峨口); C、D、E、G-五台绿岩带叠加褶皱及重褶皱(繁峙县岩头村); F-铁矿层形成紧闭褶皱(繁峙县山羊坪); H-绿岩带不对称褶皱(五台县鸿门岩); I-硫铁矿紧闭褶皱(五台县金岗库); J、K-前陆盆地豆村亚群的巨型平卧褶皱(五台县寺明月池)及小尺度褶皱(五台县香峪)

Fig.4 Field photos showing various folds and foliations of Wutai Greenstones and foreland basin

A, B- Intruded mafic dyke being structural substituted horizontally and foliated (Ekou, Daixian); C, D, E, G- Superimposed folds and refolds of Wutai greenstone belt (Yantou, Fansi); F- Closed folds of BIF (Shanyangping, Fansi); H- Assymetry folds of greenstone belt (Hongmenyan, Wutai); I- Closed folds of pyrites (Jingangku, Wutai); J, K- Giant recumbent folds of Doucun Subgroup in the foreland basin (Mingyuechi, Wutai) and small scale folds (Xiangyu, Wutai)

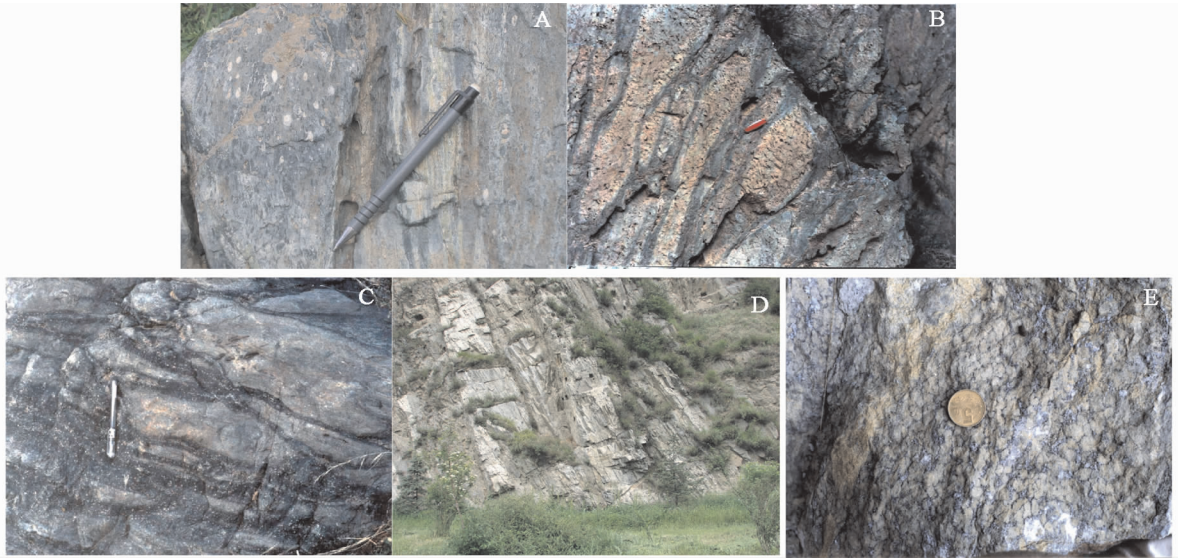


图5 五台绿岩带的保留的岩浆岩结构构造

A-气孔-杏仁构造(五台县东台沟); B、C-枕状熔岩(繁峙县塔儿坪、圭峰寺); D-五台绿岩带内的基性岩墙; E-高镁纯橄岩(五台县铜钱沟)
 Fig.5 Field photos showing the relict magmatic textures and structures of Wutai Greenstones
 A- vesicular and amygdaloidal structures (Dongtaigou, Wutai); B, C- Pillow lava (Taerping and Guifengsi, Fansi); D- Mafic dykes intruded into Wutai greenstone belt; E- Mg-rich dunite (Tongqiangou, Wutai)

表2 五台造山杂岩及其前陆冲断带的构造样式特征

Table 2 Summary of major structural patterns of Wutai Mt.

构造单元	岩性组合	构造样式	构造热事件(变形变质及岩体侵位)
前陆冲断带	豆村亚群磨拉石建造	大型平卧褶皱、逆冲断层。常保留原始的火 山(气孔、杏仁)、沉积构造(波痕、泥裂、韵 律层)	沉积层序较完整,弱轴面置换为特点
	高凡亚群浊积岩建造	逆冲断层、平卧褶皱、连续褶皱、面理置换。 常保留原始的沉积构造(交错层、韵律层)	以弱变质沉积逆冲褶皱变形及强烈轴面面理发 育为特点
造山杂岩	五台绿岩带	绿片岩相区发育叠加褶皱、重褶皱、面理置 换、局部保留变余火山、沉积构造(气孔、杏 仁、沉积韵律) 角闪岩相区发生强烈面理置换、罕见原生构 造(枕状构造)	绿片岩相区岩体具有浑圆形态(王家会),为底 辟侵位。角闪岩相区,TTG-花岗岩岩体形态与 围岩整合、边界简单(如北台、义兴寨、石佛岩 体)

图上,绿岩带与花岗质片麻岩体之间锯齿状的构造边界,也指示构造叠置作用。花岗片麻岩内常见基性岩墙,经历强烈构造置换与片麻岩面理平行化,如峨口花岗岩体。

3.5 前陆冲断带的主要构造样式

前陆盆地沉积主要由五台山西南部的高凡亚群及豆村亚群组成,代表性构造剖面有台怀—石咀前陆冲断带构造剖面、豆村—清凉寺构造剖面等(图4J, K),完整地展示了五台造山带由造山杂岩向前陆盆地变化的连续构造地层剖面(表2)。

3.5.1 高凡亚群构造剖面

高凡亚群分布于代县洪寺一般家会一带,为深海复理石建造(白瑾等,1992, 1996; 徐朝雷,1990; 田永清,1991)。在代县高凡一般家会,高凡亚群东南部角度不整合于五台绿

岩带上(图3A),并被豆村亚群不整合覆盖。高凡亚群主体形成大规模平卧褶皱及复式向斜,轴面向西北倾斜,地层主体产状平缓。平缓地层常形成不对称小型褶皱,记录层间初始的构造滑动。在西北侧高凡亚群被五台绿岩带逆掩,发育大规模逆冲推覆构造,造成地层构造叠置(徐朝雷,1990)。高凡亚群形成紧闭褶皱、尖棱褶皱、叠加褶皱以及轴面劈理面,在高凡一般家会常见。在代县赵皋观高凡亚群发生不全面理置换构造,片理与层理交切关系明显保存。向南东,褶皱层间滑动明显,变形透入性减弱,发育间隔劈理发育(局部强片理化带等),薄层岩石变形增强(紧闭褶皱等)。

3.5.2 豆村亚群构造剖面

由略开阔不对称复向斜组成(白瑾,1986),次级褶皱形态不对称,褶皱轴面及逆断层向北西倾斜,指示向南东逆掩。邻近五台花岗岩—绿岩带与前陆盆地边界处,形成逆断层,

花岗岩常被强烈剪切变形,造成不同尺度的花岗岩构造透镜体为强应变带分隔。在五台山腹地的宽滩、中台、下蛇神等地,四集庄组砾岩及南台组石英岩呈小规模向形或岩片出现于五台杂岩之间,并经历强烈构造变形,砾石基质被强烈面理化,形成片状砾岩及石英片岩。应变测量表明砾石的轴比由西北向东南逐渐减小(张忻等,1991),表明应变向东南减弱。在五台山东北部石塘沟村西,南台组石英岩保留鞘褶皱群,为强烈韧性剪切强应变的产物。四集庄组砾岩、大石岭组千枚岩常被面理置换,发生构造压扁作用,与褶皱作用密切相关。上述构造特征指示五台山造山杂岩冲断作用对前陆盆地磨拉石沉积的强烈改造。

在五台杂岩东南缘的前陆冲断带内(台怀—石咀构造剖面),四集庄组—大石岭组形成同斜倒转褶皱、重褶皱、大规模平卧褶皱和片理叠加普遍(如镇海寺),逆冲型韧性剪切带发育(图4J, K)。大规模褶皱的轴面普遍向西北倾斜,褶皱不对称形态,指示由西北向东南逆掩,五台杂岩逆冲于前陆盆地上。上述构造至少记录2期叠加褶皱变形(白瑾等,1996),第2期构造变形的强度向东南逐渐减弱,为递进变形的产物。

从五台山西北部的高凡亚群浊积岩系到东南部的豆村亚群,前陆盆地地层的构造变形强度逐渐减弱。高凡亚群至少经历2~3期强烈构造变形,形成大规模平卧复向斜褶皱,并被递进褶皱变形叠加,出现重褶皱及面理置换。所形成的次级褶皱轴面向西北倾斜,西北翼倒转陡立,而东南翼缓倾(白瑾,1986)。而豆村亚群主要经历两期强烈变形褶皱,并且与高凡亚群晚期变形连续变化,记录由西北向东南的递进剪切变形过程,形成一系列东北向线状的紧闭—等斜褶皱及平卧褶皱,轴面向西北倾斜。

岩相古地理分析表明,前陆盆地古构造格局为东北向(李江海和翟明国,1996),表明五台山造山带构造大致为东北向展布。事实上造山杂岩核部的含铁岩系及绢英片岩褶皱也勾画出了东北向的构造格架,它们向北变为近东西向(朱家坊),向东北变为近南北向(如龙泉关剪切带),指示古元古代末期掀斜或走滑作用造成造山带构造方位偏转。

综上所述,五台山造山带主体构成一个向东南倒转的不对称扇状的复向形,发育多级和多期褶皱与断层,构造压扁紧闭程度向核部逐渐增强。造山带核部以紧闭褶皱、叠加褶皱为主,褶皱幅度较大;东南部以冲断构造带为特征,沉积地层广泛发育逆冲断层,褶皱形态不完整、形态不对称、幅度小。褶皱轴面由中心向边部呈扇形撒开。各类构造变形域在空间上有规律分布:褶皱基底多位于造山带外围或复背斜的核部;构造岩片出现在东南侧;推覆片体靠内一些,褶皱片体位于造山带核部;底辟岩体则是褶皱带(复向斜)次级背斜的核心,因而也靠近边部;褶皱浅层多与褶皱片体伴生,位于造山带的内部或迁移出主造山带。五台绿岩带至少经历多期断裂变形和褶皱变形,早期褶皱和断裂主要受伸展作用和花岗岩底辟所控制,而现存的北东东向褶皱格局是古

元古代末期构造运动的产物,它使溥沱群紧闭褶皱,并使五台群的早期褶皱变为倒转平卧的型式。

4 五台山造山带的构造样式及其层次变化

4.1 五台山变质区地壳掀斜特征

五台山为第三纪以来形成的断块山脉,它的变质基底地质组成、构造样式及其变质相,沿东北走向上变化明显,表明地壳曾发生掀斜作用。主要地质证据如下:

在构造形态上,五台绿岩带及前陆冲断带主期褶皱枢纽和矿物B线理主体为东北走向,向西南方向缓倾伏(白瑾,1986;田永清,1991)。在地质组成上,五台绿岩带向东北走向上,逐渐被大面积的TTG片麻岩取代。在深成片麻岩体与绿岩带交界处,出露众多褶皱的转折端,巨型向型的转折端见于宽滩附近,枢纽也向西南倾伏。在高凡—滩上东部、台怀—石咀一线以东,多个向形中小型褶皱转折端出露,枢纽均向西南倾伏,其中,向形转折端向东北闭合,背形转折端向西南闭合。另外,前陆盆地褶皱带沿走向向东北,宽阔的褶皱带变为狭窄冲断构造带,并且并向东北方向上逐渐出露被动陆缘沉积及改造的陆块基底。

在变质相方面,五台山变质相带界线大致呈东北-西北向锯齿状分布,与绿岩带东北向构造线交切,造成变质相界线与构造界线犬牙交错,一些标志岩性层(大石岭组、板峪口组、绿岩带)的变质相在走向上向东北增高(白瑾等,1986;徐朝雷,1990;胡学智,1992)。例如,绿片岩相火山沉积岩见于豆村—高凡附近,角闪岩相火山沉积岩见于峨口—东山底、石咀—神堂堡等地。角闪岩相片麻岩见于北台—伯强、雁门关等地,而高角闪岩—麻粒岩相片麻岩—高压麻粒岩见于恒山东北部、五台东北部等地(李江海等,2001)。另外, $P-T$ 计算表明,五台、恒山东北部变质压力和温度均高于五台山西南部(党修鹏,1993;田永清,1991)。因此,五台山造山杂岩变质相沿走向向东北逐渐增高,也支持造山带地壳向西南掀斜的解释。

在古元古代末期地质演化方面,西北向的基性岩墙群(侵位时代约1769~1800Ma)主要侵位于五台山、恒山及太行山角闪岩相—麻粒岩相区。向五台山西南部低级变质区,基性岩墙群的数目逐渐减少直到消失,被长城系沉积盖层所取代。基性岩墙群主要侵位于中上地壳环境,表明这一时期五台山东北部尚处于中上地壳环境,而西南部以地表沉积盆地环境为特征。

为此,五台山总体构成一个东北向展布的碰撞造山带,并向西南掀斜,出露早期造山带浅-中层次连续变化构造剖面。以此为依据,可以认为五台山区所代表的造山带区段构造为东北走向,其东侧北东东向构造是晚期构造掀斜改造、出露深层次构造的产物。这种地壳层次变化相关的构造方位差异,应是早前寒武纪构造恢复中应予关注的问题,不消除晚期变形对早期构造格局的改造作用,将得出片面的认识和结论。

4.2 五台山造山带横剖面构造恢复

依据正投影原理,选择数十个关键地质点及其标高,通过计算和校正可以获得五台山区构造横剖面略图(图6),剖面厚度约25km左右。横剖面表明,五台山早前寒武纪区可以划分上下两个构造层:东冶亚群和下伏变质单元(包括:造山杂岩、前陆冲断带、再造基底等)。东冶亚群不整合于造山带杂岩上,以开阔复式向形为特征。而下伏的变质构造样式复杂,由东缘前陆冲带(低角度冲断构造、蛇绿岩混杂带)、五台绿岩复杂褶皱带及TTG-花岗岩杂岩体组成。东部前陆区的阜平杂岩向西俯冲于五台造山带杂岩之下,大陆基底发生强烈活化,被动陆缘沉积被大规模逆掩。前陆冲断带位于磨拉石沉积之下,磨拉石沉积又超覆于前陆盆地复理石沉积上。

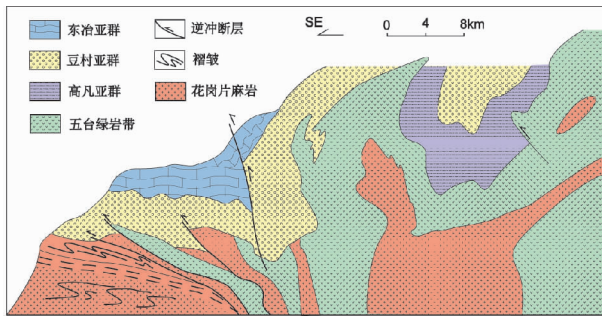


图6 五台山区构造横剖面(据计算结果及野外观察修正)

Fig. 6 Cross section of Wutai Mt. showing main features of Structural geology

在垂向上,浅表层次为五台绿岩带和前陆盆地沉积(高凡亚群和豆村亚群)复向形。向中深层次,五台绿岩带渐变为狭窄的构造岩片和褶皱根带,向更深部以大规模TTG杂岩-花岗岩为主。上述构造横剖面还揭示,五台造山带杂岩主体保留造山带挤压的构造格局,后期伸展改造并不明显,晚期的东冶亚群构造变形叠加于下伏造山杂岩基底上,但构造变形更加开阔,褶皱轴面相对陡立,具有克拉通早期沉积盖层特点。

4.3 五台山造山带构造样式的垂向变化

横穿五台山区的4条构造剖面如图7所示,通过对比不同剖面上构造样式的变化,可得出造山带地壳随深度构造样式的变化特征的认识。

在东部剖面(台怀—金刚库—湾子剖面),缺失前陆盆地下部地层高凡亚群,以上部地层豆村亚群为主,后者呈一系列不对称向斜夹持于造山带杂岩(蛇绿混杂带)、被动陆缘沉积及活化基底杂岩(金刚库片麻岩体)之间。豆村亚群形成大规模平卧褶皱或不对称向斜,向斜西北翼普遍被逆断层强烈改造,东南翼略平缓。向东部,出现蛇绿混杂带及叠瓦状构造带(如低角度的龙泉关剪切带),造成被动陆缘沉积与五台绿岩带构造叠置,而浅层次磨拉石沉积已被剥蚀。

在中部剖面(峨口—岩头—西柳院剖面),五台北坡绿岩带及花岗岩体的构造面理向东南倾斜,构造向西北推覆,五台绿岩带逆掩于峨口同构造花岗岩体及恒山杂岩之上。

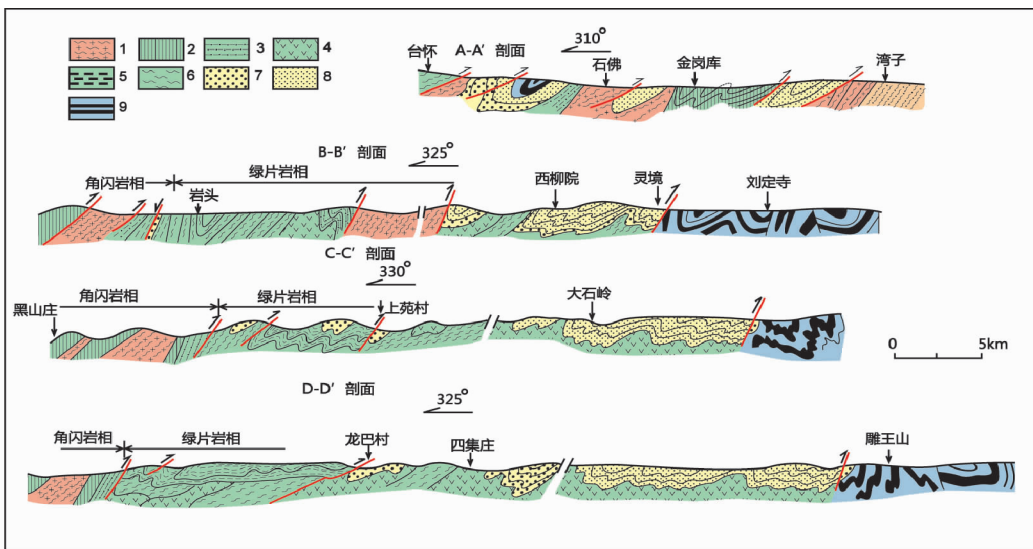


图7 五台山前陆冲断带代表性构造构造剖面(剖面位置见图1)(据徐朝雷,1990;田永清,1991;修改补充)

1-花岗岩片麻岩; 2-6 五台绿岩带: 2-金刚库组; 3-庄旺组; 4-柏枝岩组; 5-文溪组; 6-鸿门岩组; 7-8 豆村亚群: 7-四集庄组; 8-南台组-大石岭组; 9-东冶亚群

Fig. 7 Map showing major geological profiles of foreland fold-thrust belt, Wutai Mt (after Xu, 1990; Tian, 1991)

1-granitic gneisses; 2-6 Wutai greenstone belt: 2-Jingangku Formation; 3-Zhuangwang Formation; 4-Baizhiyan Formation; 5-Wenxi Formation; 6-Hongmenyan Formation; 7-8 Doucun Subgroup: 7-Sijizhuang Formation; 8- Nantai-Dashiling Formation; 9-Dongye Subgroup

在五台山核部,绿岩主体形成大规模平卧褶皱,并被后期褶皱叠加,形成复式褶皱。岩头附近,为绿岩带复向斜核部,广泛出现叠加褶皱。在不同尺度上绿岩带褶皱转折端明显加厚。在剖面东南部,五台绿岩带及花岗岩逆掩于前陆盆地上部的豆村亚群沉积地层上。

在西部剖面上(黑山庄—大石岭剖面、龙巴村—四集庄),出露部分五台绿岩带及王家会花岗岩,前陆盆地沉积地层保存较完整(高凡亚群、豆村亚群),特别是保留了其他剖面缺乏的高凡亚群。绿岩带和冲断带的构造样式均以大规模平卧褶皱为特征,局部有层间小褶皱,主体缓倾斜,叠加褶皱不明显发育。前陆盆地沉积被强烈构造置换。前陆盆地沉积地层平卧褶皱的发育与造山杂岩构造变形并向前陆地区传播扩展相关,盆地早期沉积地层被造山杂岩构造逆掩而变形变质,盆地晚期沉积向前陆持续超覆。

根据区域构造掀斜及上述剖面对比分析,可以提出五台山区不同层次构造变化特征。沿着造山带走向,由东北向西南变质相变浅,构造样式发生规律变化。五台造山杂岩浅层次以表壳岩系平卧褶皱叠加变形而成的复式褶皱为主,前陆盆地沉积层序保存完好,以五台中西部构造剖面为代表。中层次以狭窄的绿岩带构造岩片与片麻岩构造叠置为特征,并出现蛇绿岩混杂带。前陆盆地沉积地层以小规模残留向形保存,发育低角度韧性剪切带,造成褶皱被强烈构造置换,以五台东部剖面为代表。向深层次,绿岩带复式褶皱渐变为TTG杂岩内的表壳岩构造岩片,有的花岗片麻岩呈席体构造叠置于绿岩带上,以在伯强以东—神堂堡为代表。在五台山东北部—恒山东部高角闪岩—麻粒岩相片麻岩区,片麻岩广泛出现重熔花岗岩条带,代表本区最深的地壳层次。

5 讨论和结论

(1)五台山变质岩区发育丰富的、不同尺度的叠加褶皱,造成绿岩带发生强烈的水平缩短。从造山带核部杂岩到前陆盆地,构造变形期次减少、变形强度减弱。五台山造山带构造形态不对称,东南构造平缓,西北构造陡立。尽管经历局部伸展,整体上保留挤压构造形态,为世界上保留下来的早前寒武纪典型造山带构造样式。

(2)五台山西南部的东冶亚群代表华北克拉通早期的沉积盖层。五台山变质岩区向西南掀斜,提供了新太古代末期造山带及其前陆冲断带浅-中层次连续的地壳构造剖面。浅部层次造山带主要构造样式为叠加褶皱、复杂褶皱、平卧褶皱发育,以五台山西南部特征。向五台山东北部,造山带层次变深,表壳岩系比例明显减少,逐渐以TTG片麻岩为主体;表壳岩系被强烈构造置换,局部保留无根褶皱,熔融程度增强,大尺度的叠加褶皱不发育。

(3)五台山造山带及前陆盆地的中浅层次完美保存,特别是前陆盆地保留了巨厚的复理石和磨拉石沉积地层(>2358Ma)。前陆褶皱冲断带发生强烈构造变形,记录太古宙

末期板块碰撞造山作用。在垂直造山带走向上,前陆盆地具有构造不对称性,随着造山带隆升,由早期狭窄的深水盆地向后期开阔浅水沉积盆地演化,并发生向东南的构造迁移和沉积超覆。磨拉石建造与下伏高凡亚群复理石地层渐变,磨拉石建造的出现标志着大规模碰撞造山活动的开始,形成巨大的地貌高差。四集庄组磨拉石变形程度、物源成分均显示变化极性,一致于造山带横向上向前陆地区的构造扩展。

(4)五台绿岩带与花岗片麻岩之间的近水平韧性剪切带,被叠加褶皱变形为复式向形,在复式向形核部,早期平卧褶皱被轴面直立的次级褶皱叠加变形,记录早期大规模的近水平构造冲断变形和地壳加厚。蛇绿岩混杂带位于被动陆缘沉积地层上,记录早期洋盆闭合过程。

(5)四集庄组砾岩保留糜棱岩、褶皱转折端等特征的砾石,记录五台山太古宙末期强烈的构造变形及其隆升剥蚀作用。五台山造山带与前陆盆地构造的格局,指示东部陆块被动边缘向西部陆块活动边缘持续俯冲、最终碰撞,发生NW-SE向上的构造挤压和地壳缩短,是早期板块构造演化的重要例证。

致谢 野外工作先后得到田永清、徐朝雷、武铁山教授级工程师的帮助和指导,参加野外研究的还有侯贵廷、张志强、冯军、黄雄南、贺电、黄宽、程素华, Kusky T, Polat A, Woods C, Dingwall P 等。IGCP509 野外考察期间(2007年8月,山西五台山),与翟明国、郭敬辉、赵国春、彭澎、Evans D, Bleeker W, Reddy S 等教授的野外交流和研讨,使论文中的认识不断完善。

References

- Bai J, Huang XG and Wang HC. 1996. Precambrian Crustal Evolution in China. Beijing: Seismological Press, 20-60 (in Chinese)
- Bai J, Wang RZ and Guo JH. 1992. The Early Precambrian Important Events and Ages in Wutai. Beijing: Geological Publishing House, 6-32 (in Chinese)
- Bai J. 1986. Early Precambrian Geology in Wutai. Tianjin: Tianjin Science Technology Press; 1-247 (in Chinese)
- Dang XP. 1993. Regional metamorphic zone and stages of the metamorphic terrain at Wutai Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 9(1): 55-69 (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
- Hu XZ. 1992. New division for succession of Wutai Group in Wutaishan area. *Shanxi Geology*, 7(2): 498-560 (in Chinese with English abstract)
- Krüner A, Wilde SA, Li JH and Wang K. 2005. Age and evolution of a Late Archean to Early Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 577-595
- Kusky TM and Li J. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(4): 383-397
- Kusky TM, Li JH and Santosh M. 2007. The Paleoproterozoic North Hebei Orogen: North China craton's collisional suture with the

- Columbia supercontinent. *Gondwana Research*, 12: 4–28
- Kusky TM, Li JH, Glass A and Huang XN. 2004. Origin and environment of Archean Ophiolites of the Central orogenic belt, North China Craton. In: Kusky TM (ed.). *Precambrian Ophiolites and Related Rocks. Developments in Precambrian Geology*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 223–274
- Li JH and Kusky TM. 2007. A Late Archean foreland fold and thrust belt in the North China Craton: Implications for early collisional tectonics. *Gondwana Research*, 12, 47–66
- Li JH and Zhai MG. 1996. Tectonic division of high-grade metamorphic terrain and late Archean tectonic evolution in north-central part of North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 12(2): 179–192 (in Chinese with English abstract)
- Li JH, Kröner A, Huang XN, Liu SW, and Zhang ZQ. 2001. Discovery of mafic dyke swarms in Hengshan area and the break-up of greenstone in Wutai Group. *Science in China (Series D)*, 31(11): 902–910 (in Chinese)
- Li JH, Kusky TM and Huang XN. 2002. Archean Podiform chromitites and mantle tectonites in ophiolitic mélange. North China Craton: A record of early oceanic mantle processes. *GSA Today*, 12(7): 4–11
- Li JH, Kusky TM, Niu XL, Feng J and Polat A. 2004. Neorchean massive sulfide of Wutai Mountain, North China: A black smoker chimney and mound complex within 2.50Ga-old oceanic crust. In: Kusky TM (ed.). *Precambrian Ophiolites and Related Rocks. Development in Precambrian Geology*. Elsevier B. V., Amsterdam, Netherlands, 339–362
- Li JH, Niu XL and Chen Z. 2005. Discovery of deep-level foreland thrust-fold structures in Taihang Mt. and its implication for early tectonic evolution of North China. *Progress in Natural Science*. 15(3): 229–238
- Li JH, Niu XL and Qian XL. 2006a. Division of Archean/Proterozoic boundary and its implication for geological evolution in Wutai Mountain area, North China. *Geotectonica et Metallogenia*, 30(4): 409–418 (in Chinese with English abstract)
- Li JH, Niu XL, Cheng SH and Qian XL. 2006b. The Early Precambrian tectonic evolution of continental craton: A case study from North China. *Earth Science*, 31(3): 285–293 (in Chinese with English abstract)
- Li JH, Liu SJ, and Hou GT. 2006c. Nature of the latest Paleoproterozoic tectono-magmatic event in central North China and its tectonic genetic model. *Geology in China*, 33(6): 60–70 (in Chinese with English abstract)
- Li JH, Niu XL, Huang XN and Feng J. 2002. Podiform chromitites: A key to identify the ancient oceanic lithospheric relicts. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 235–246 (in Chinese with English abstract)
- Li JH, Niu XN, Kusky TM and Polat A. 2004a. Neorchean plate tectonics evolution of North China and its correlation with global cratonic blocks. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 273–283 (in Chinese with English abstract)
- Li JL, Wang KY, Wang QC, Liu XH and Zhao ZY. 1990. Early Proterozoic collision mountain belt in Wutaishan area, China. *Scientia Geologica Sinica*, 25(1): 1–11 (in Chinese with English abstract)
- Liu SJ and Li JH. 2007. Review of ultrahigh temperature (UHT) metamorphism study: A case from North China Craton. *Earth Science Frontiers*, 14(3): 131–137 (in Chinese with English abstract)
- Miao PS, Zhang ZF, Zhang JZ, Zhao ZX and Xu SC. 1999. Paleoproterozoic stratigraphic sequence in the Wutai Mt. area. *Regional Geology of China*, 18(4): 405–413 (in Chinese with English abstract)
- Niu XL and Li JH. 2006. Geochronology and geological event sequences of Hengshan-Wutai Precambrian Complex. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 42(4): 439–445 (in Chinese with English abstract)
- Polat A, Kusky TM and Li JH. 2005. Geochemistry of Neorchean (ca. 2.55–2.50Ga) volcanic and ophiolitic rocks in the Wutaishan greenstone belt. central orogenic belt. North China craton: Implications for geodynamic setting and continental growth. *GSA Bulletin*, 117(11/12): 1387–1399
- Santosh M, Tsunogae T, Li JH and Liu SJ. 2007. Discovery of sapphirine-bearing Mg-Al granulites in the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic ultrahigh temperature metamorphism. *Gondwana Research*, 11(3): 263–285
- Shen BF and Mao DB. 2003. On Wutai Group geochronology. *Geological Survey and Research*, 26(2): 72–79 (in Chinese with English abstract)
- Tian YQ. 1991. *Geology and gold mineralization in the Wutaishan-Hengshan Greenstone belt*. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Publishing House, 14–215 (in Chinese)
- Trap P, Faure M, Lin W, Bruguier O and Monié P. 2008. Contrasted tectonic styles for the Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Evidence for a ~2.1Ga thermal and tectonic event in the Fuping Massif. *Journal of Structural Geology*, 30(9): 1109–1125.
- Trap P, Faure M, Lin, W, and Monie P. 2007. Late Paleoproterozoic (1900–1800 Ma) nappe stacking and polyphase deformation in the Hengshan Wutaishan area: Implications for the understanding of the Trans-North-China Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 156: 85–106
- Wang KY and Wilde SA. 2002. Precise SHRIMP U-Pb ages of Dawaliang granite in Wutaishan area, Shanxi Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(4): 407–411 (in Chinese with English abstract)
- Wang KY, Hao J, Wilde S and Cawood P. 2000. Reconsideration of some key geological problems of Late Archean-Early Proterozoic in the Wutaishan-Hengshan area: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon data. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2): 175–184 (in Chinese with English abstract)
- Wang KY, Li JL, Hao J, Chai YC and Zhou SP. 1997. Late Archean mafic-ultramafic rocks from the Wutaishan, Shanxi Province: A possible ophiolite mélange. *Acta Petrologica Sinica*, 13(2): 139–151 (in Chinese with English abstract)
- Wang KY, Li JL, Hao J, Li JH and Zhou SP. 1996. The Wutaishan orogenic belt within the Shanxi Province. northern China: A record of late Archean collision tectonics. *Precambrian Research*, 78: 95–103
- Wang RZ, Yan YY, Li HM and Lin YX. 1997. The Early Precambrian chronotectonic framework in the Wutaishan area, Shanxi. *Progress in Precambrian Research*, 20(2): 44–50 (in Chinese)
- Wang ZH, Wilde SA, Wang KY and Yu LJ. 2004. A MORB-arc basalt adakite association in the 2.5Ga Wutai greenstone belt: Late Archean magmatism and crustal growth in the North China Craton. *Precambrian Research*, 131(3–4): 323–343
- Wilde SA, Cawood PA and Wang KY. 1997. The relationship and timing of granitoid evolution with respect to felsic volcanism in the Wutai complex, North China craton. In: Qian XL and You ZD (eds.). *Proc. 30th Int'l. Geol. Congr.*, 17(1): 75–87
- Wilde SA, Cawood PA and Wang KY. 1998. SHRIMP U-Pb zircon dating of granites and gneisses in the Taihangshan-Wutaishan area: implications for the timing of crustal growth in the North China Craton. In: Abstracts of ICOG-9, 1998, Beijing. *Chinese Science Bulletin*, 43(supplement): 44
- Wilde SA, Cawood PA and Wang KY. 2005. Granitoid evolution in the Late Archean Wutai Complex, North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 597–613
- Xu CL. 1990. *Mapping Methods to Medium-low Grade Metamorphic Terrain*. Taiyuan: Science & Edu. Publishing House of Shanxi (in Chinese)
- Zhang X, Xu CL and Xu YH. 1991. The features of gravel fabrics of Hutuo Group conglomerate in Wutai Mountains, Shanxi. *Shanxi Geology*, 6(3): 348–355 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC, Sun M and Wilde SA. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Research*, 136: 177–202

附中文参考文献

- 白瑾. 1986. 五台山早前寒武纪地质. 天津: 天津科学技术出版社出版, 1-247
- 白瑾, 黄学光, 王惠初等. 1996. 中国前寒武纪地壳演化. 北京: 地质出版社, 20-60
- 白瑾, 王汝铮, 郭进京. 1992. 五台山早前寒武纪重大地质事件及其年代. 北京: 地质出版社, 6-32
- 党修鹏. 1993. 五台山变质地体的区域变质相带和变质期次. 岩石学报, 9(1): 55-69
- 胡学智. 1992. 五台山五台群层序的新厘定. 山西地质, 7(2): 498-560
- 李继亮, 王凯怡, 王清晨, 刘小汉, 赵中岩. 1990. 五台山早元古代碰撞造山带初步认识. 地质科学, 25(1): 1-11
- 李江海, 翟明国. 1996. 华北中北部高级变质岩区的构造区划及其晚太古代构造演化. 岩石学报, 12(2): 179-192
- 李江海, 牛向龙, 黄雄南, 冯军. 2002. 豆荚状铬铁矿: 古大洋岩石圈残片的重要证据. 地学前缘, 9(4): 235-246
- 李江海, Kröner A, 黄雄南, 刘树文, 张志强. 2001. 恒山地区变基性岩墙群的发现及“五台群”绿岩地层的解体. 中国科学(D辑), 31(11): 902-910
- 李江海, 牛向龙, Kusky TM, Polat A. 2004a. 从全球对比探讨华北早期板块构造过程. 地学前缘, 11(3): 273-283
- 李江海, 牛向龙, 陈征, Kusky TM, Polat A. 2004b. 太行山区深层次逆冲推覆构造的发现及其地质意义. 自然科学进展, 14(10): 1118-1127
- 李江海, 牛向龙, 钱祥麟. 2006a. 五台山区太古宙/元古宙界线划分及其地球演化意义. 大地构造与成矿, 30(4): 409-418
- 李江海, 牛向龙, 程素华. 2006b. 大陆克拉通早期构造演化历史探讨: 以华北为例. 地球科学, 31(3): 285-293.
- 李江海, 刘守偈, 侯贵廷. 2006c. 华北中部古元古代末期构造热事件性质及其构造成因模式. 中国地质, 33(6): 60-70
- 刘守偈, 李江海. 2007. 超高温变质作用: 以华北内蒙古土贵乌拉地区为例. 地学前缘, 14(3): 131-137
- 苗培森, 张振福, 张建中, 赵祯祥, 续世朝. 1999. 五台山区早元古代地层层序探讨. 中国区域地质, 18(4): 405-413
- 牛向龙, 李江海. 2006. 恒山-五台山同位素年代学与地质事件演化格架的认识. 北京大学学报(自然科学版), 42(4): 439-445
- 沈保丰, 毛德宝. 2003. 论五台群的时代. 地质调查与研究, 26(2): 72-79
- 田永清. 1991. 五台-恒山绿岩带的地质与成矿作用. 太原: 山西科技出版社: 14-215
- 王凯怡, 李继亮, 郝杰, 柴育成, 周少平. 1997. 山西省五台山晚太古代镁铁质-超镁铁质岩: 一种可能的古蛇绿岩混杂岩. 岩石学报, 13(2): 139-151
- 王凯怡, 郝杰, Wilde S, Cawood P. 2000. 山西五台山-恒山地区晚太古代-早元古代若干关键地质问题的再认识: 单颗粒锆石离子探针质谱年龄提出的地质制约. 地质科学, 35(2): 175-184
- 王凯怡, Wilde S. 2002. 山西五台地区大洼梁花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 精确年龄. 岩石矿物学杂志, 21(4): 407-411
- 王汝铮, 颜耀阳, 李惠民, 林源贤. 1997. 山西五台山区早前寒武纪年代构造格架. 前寒武纪研究进展, 20(2): 44-50
- 徐朝雷. 1990. 中浅变质岩区填图方法-五台山区构造-地层法填图研究. 太原: 山西科学教育出版社
- 张忻, 徐朝雷, 徐有华. 1991. 滹沱群变质砾岩的砾石组构特征. 山西地质, 6(3): 348-355