

doi: 10.12097/gbc.2023.11.044

华北克拉通中部造山带中条山地区古元古代盆地演化

王晓青^{1,2}, 刘敏^{3*}, 毛景文¹

WANG Xiaoqing^{1,2}, LIU Min^{3*}, MAO Jingwen¹

1. 长安大学球科学与资源学院, 陕西 西安 710054;

2. 河南发恩德矿业有限公司, 河南 洛阳 471700;

3. 中国地质大学(北京), 北京 100083

1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Henan Found Mining Co., LTD., Luoyang 471700, Henan, China;

3. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China

摘要: 对华北克拉通中部造山带南部中条山地区古元古代中条群和担山石群岩石组合及地层详细调查研究, 认为中条群为一套由粗碎屑岩-泥质岩-碳酸盐岩组成的多旋回沉积岩, 变质砂岩地球化学特征显示, 中条群经历了早期相对稳定到后期较活跃的转变。结合前人碎屑锆石年龄、源区特征和火山岩夹层年龄得出, 中条群形成于 2.1 Ga 左右的活动大陆边缘弧后盆地。担山石群为一套砾岩-砂岩组成的磨拉石建造, 碎屑锆石年龄显示, 担山石群形成于 1.85 Ga 左右的碰撞造山阶段的前陆盆地内。结合前人研究, 认为中条山地区古元古代盆地演化模式为, 约 2.1 Ga 开始, 西部陆块的前导洋向东部陆块活动大陆边缘之下持续俯冲, 东部陆块西缘活动大陆边缘弧后盆地沉积了中条群, 约 1.85 Ga 开始, 东部陆块与西部陆块之间的大洋闭合, 陆陆碰撞开始, 中条群发生挤压褶皱变形, 陆壳加厚及随后的快速抬升和剥蚀形成前陆盆地的担山石群磨拉石。中条山地区古元古代弧后盆地向前陆盆地的转化支持华北克拉通最初西部陆块向东俯冲, 经历了约 1.85 Ga 的东、西陆块碰撞并最终克拉通化的演化模式。

关键词: 华北克拉通; 中部造山带; 中条山; 弧后盆地; 前陆磨拉石盆地; 地质调查工程; 古元古代

中图分类号: P534.3; P597^{+.3} **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)04-0546-15

Wang X Q, Liu M, Mao J W. The Paleoproterozoic basin evolution of the Zhongtiao Mountain region in the Trans-North China Orogen, North China Craton. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(4): 546-560

Abstract: This paper conducted detailed investigations of the lithological assemblages and stratigraphy of the Zhongtiao Group and the Danshanshi Group in Zhongtiao Mountain region, Trans-North China Orogen (NTCO), North China Craton. The Zhongtiao Group comprises of a suit of metamorphic sedimentary rocks, consisting of multicyclic sedimentary rocks composed of clastic rocks, mudstones and carbonate rocks. The geochemical characteristics of the metamorphic sandstone show that the Zhongtiao group experienced a transition from early relative stability to late activity. The age and source characteristics of detrital zircons from the Zhongtiao Group and age of intercalated volcanic rock indicate that they were deposited in a back-arc basin of active continental margin from ~2.1 Ga. The Danshanshi Group is a series of conglomerates and sandstones forming a molasse basin during the collisional orogeny stage at ~1.85 Ga. Taken together, we present a brief scenario for the evolution of the sedimentary basin in Zhongtiao mountain region. From ~2.1 Ga, the eastward-directed subduction of the ocean between western block and eastern block,

收稿日期: 2023-11-29; 修订日期: 2024-01-15

资助项目: 中国地质调查局项目《重要矿种关键问题调查与矿产地质专题填图试点》(编号: DD20160124)和中央级公益性科研院所基本科研业务专项资金项目《山西中条山铜矿峪铜矿床地质特征及成因研究》(编号: K1408)

作者简介: 王晓青(1983-), 男, 在读博士生, 高级工程师, 从事构造地质与矿产勘查研究工作。E-mail: yc214wxq@163.com

* 通信作者: 刘敏(1983-), 女, 博士, 高级工程师, 从事金属矿床成矿规律与战略研究。E-mail: liuminhello@163.com

back-arc basin (Zhongtiao Group) developed behind the arc that located in the west margin of eastern block. At ~1.85 Ga, the ocean between western block and eastern block closed, resulting in the collision of the two blocks along TNCO, the Zhongtiao Back-arc basin underwent fold deformation and resulting in the crustal thickening followed by rapid exhumation/uplift, which shifted the back-arc basin to foreland basins. The Danshanshi molasse basin is formed in foreland basin. Such a shift from the back-arc basins to foreland basins in the Late Paleoproterozoic supports the model that the collision between Eastern and Western blocks occurred at ~1.85 Ga.

Key words: North China Craton; Trans-North China Orogen; Zhongtiao Mountain; back-arc basin; foreland molasse basin; geological survey engineering; Paleoproterozoic

哥伦比亚(Columbia)超大陆的发现, 将地球 40 多亿年演化历史中最早的超大陆汇聚事件由 11~9 亿年前(罗迪尼亚超大陆)提前至 21~18 亿年前 (Rogers et al., 2002; Zhao et al., 2002, 2003, 2016)。作为哥伦比亚超大陆的重要组成部分, 华北克拉通的演化也吸引了大批学者的注意(陆松年等, 2002; Zhang et al., 2006, 2007, 2009; 翟明国等, 2007, 2009, 2011; Xia et al., 2009; Zhao et al., 2010, 2011; 胡国辉等, 2010)。前人从岩石组合、构造样式、岩石地球化学、同位素年龄、变质作用 *P-T-t* 轨迹等方面进行了研究(翟明国等, 2000, 2004, 2012; Zhao et al., 2003,

2004, 2005; Li et al., 2007; 李三忠等, 2015, 2016; Peng et al., 2008; 朱日祥等, 2009; 耿元生等, 2010; 肖玲玲等, 2015), 讨论了华北克拉通的演化规律及最终克拉通化的时限。华北克拉通西部的阴山地块和鄂尔多斯地块在 1.95 Ga 左右沿孔兹岩带碰撞形成西部陆块; 东部的燕辽-龙岗陆块和狼林陆块在 1.9 Ga 左右沿胶-辽-吉活动带碰撞形成东部陆块; 东部陆块和西部陆块在 1.85 Ga 左右沿中部造山带发生碰撞形成统一的克拉通基底(图 1, Zhao et al., 2005, 2011)。然而, 碰撞造山方式及碰撞过程仍存在很大争议(Kusky et al., 2003; Faure et al., 2007), 受限出于

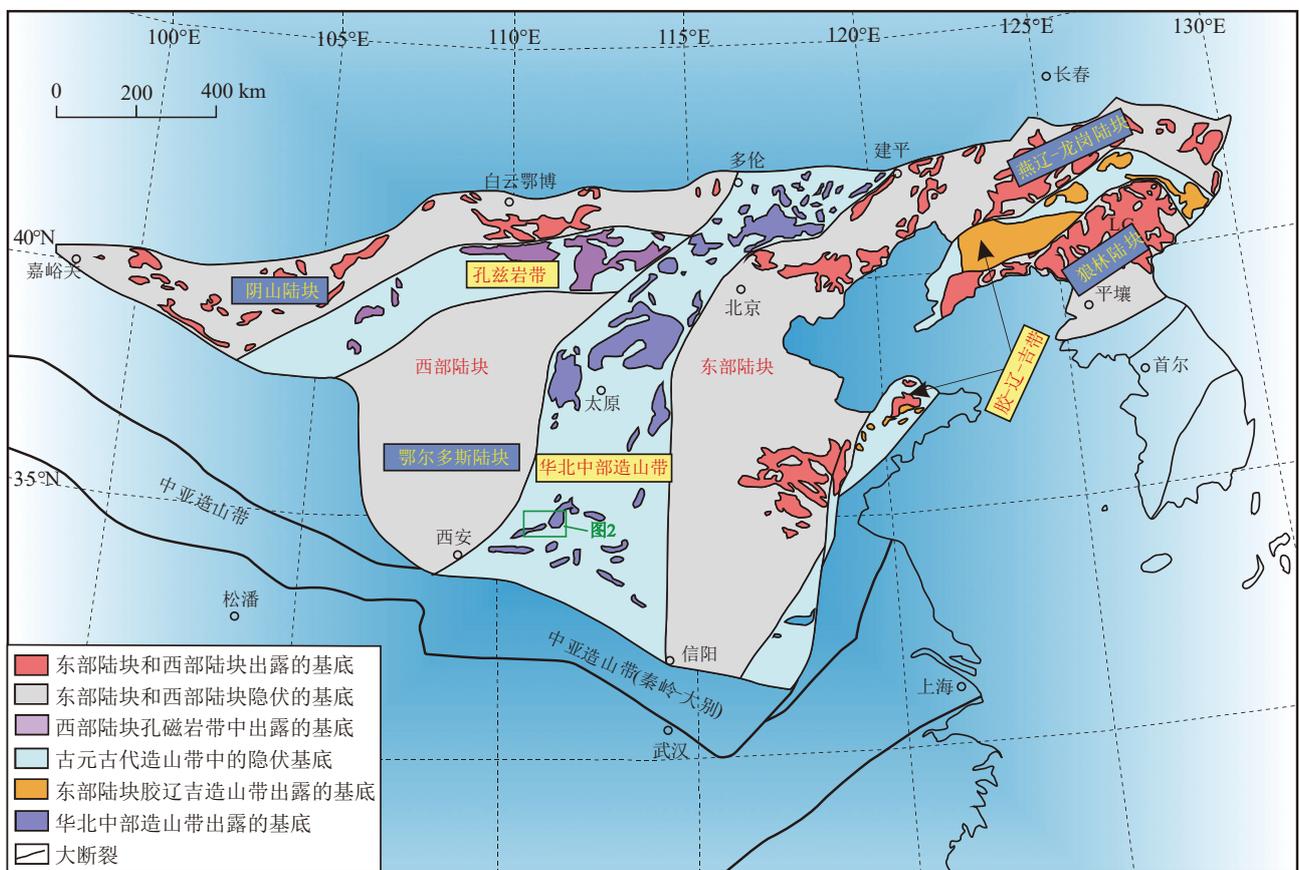


图 1 华北克拉通构造单元划分(据 Zhao et al., 2005, 2011)

Fig. 1 Tectonic subdivision of the North China Craton

露范围小和后期地质构造破坏,目前仍未发现早期俯冲阶段的弧后盆地及碰撞造山形成的前陆盆地,因此,不能很好地还原碰撞造山过程。

中条山地区位于华北克拉通中部造山带南部,出露大量早前寒武纪岩石,特别是大量分布的浅变质表壳岩,其岩石组合及变质变形特征详细记录了华北克拉通演化的重要信息,是研究中部造山带演化的理想区域。从20世纪50年代开始,山西省地质勘查局213队、214队相继在中条山地区开展了多轮次地质填图和找矿工作。同时,大量高校和地质科研生产单位也相继从地层、构造、成矿规律等方面开展了一系列专题研究(《中条山铜矿地质》编写组,1978;孙大中等,1991,1993;白瑾等,1997)。21世纪,中条山地区在岩石地球化学、同位素年代学、矿床学、构造地质学等方面又取得了一系列成果(Yu et al., 2006; 赵凤清, 2006; 郭丽爽等, 2008; Liu et al., 2011a; 张晗等, 2012; 张瑞英等, 2012, 2013, 2017; 李宁波等, 2013; 刘玄等, 2015; 王雪等, 2015; 杨崇辉等, 2015, 2018, 2020; Liu et al., 2016a, b; Qiu et al., 2016, 2017; Yuan et al., 2017; Meng et al., 2020, 2021; 邱正杰等, 2023)。近年来,中条山地区浅变质表壳岩的研究结果显示,中条群和担山石群的沉积环境、地球化学特征保留了中部造山带的重要记录,碎屑锆石既提供了地层年代学方面的信息,也为探讨沉积环境和源区特征,揭示古元古代大地构造演化过程积累了重要资料。本文在总结前人成果的基础上,通过详细调查中条群和担山石群的岩石组合特征,分析其沉积古地理环境和地球化学特征,结合中部造山带的演化历史,探讨中条山地区古元古代盆地的演化。

1 区域地质背景

中条山地区位于华北克拉通中部造山带南部(图1, Zhao et al., 2005, 2011; Liu et al., 2011a)。区内前寒武纪地层由老至新划分为6个地层单元,分别为新太古代涑水杂岩、古元古代绛县群、宋家山群、中条群、担山石群,中元古代长城系西阳河群、汝阳群(图2)。

涑水杂岩出露于中条山脉北西侧,呈北东向分布于解州—运城—夏县—闻喜—绛县—线。主要由新太古代TTG岩(2.7~2.5 Ga, 白瑾等, 1997; Tian et al., 2006; 张瑞英等, 2012)、二长花岗片麻岩及钾质花岗岩(2.47~1.94 Ga, Tian et al., 2006)和少量表壳

岩(变质基性火山岩和变沉积铁硅质岩)组成,岩石普遍遭受角闪岩相变质作用改造,局部达混合岩相,发育片麻理和条带状构造。绛县群角度不整合于涑水杂岩之上,主要分布于中条山脉北东部绛县横岭关—铜矿峪一带,在玉坡一带也有少量出露。根据岩性特征,自下而上分为横岭关亚群和铜矿峪亚群,横岭关亚群分布于横岭关一带,由一套变质碎屑沉积岩组成,李秋根等(2008)采用LA-ICP-MS碎屑锆石U-Pb法推测其最大沉积时限约为2160 Ma。铜矿峪亚群出露于垣曲铜矿峪一带,主要为一套变质火山岩和火山碎屑岩,通过火山岩及侵入的石英二长斑岩测年得到铜矿峪亚群的年龄为2273~2120 Ma(赵凤清, 2006; 张晗, 2012; Liu et al., 2016b)。中条群角度不整合于涑水杂岩和绛县群之上,分布于中条山脉北段的夏县—泗交—垣曲县一带,由变质砾岩、石英岩、大理岩和黑色片岩组成,夹有火山岩和基性侵入岩夹层, Liu et al. (2011a)采用LA-ICP-MS方法得到中条群碎屑锆石最大沉积年龄约为2169 Ma; 刘玄等(2015)采用SIMS锆石U-Pb法得到中条群下部篦子沟组基性火山岩夹层年龄约为2086 Ma; Meng et al. (2021)采用LA-ICP-MS锆石U-Pb法得到中条群篦子沟组底部的基性火山岩夹层年龄约为2088 Ma。担山石群主要呈北东向分布于北东部的加桑—垣曲县一带,主要为一套变质砾岩和石英岩组成的碎屑岩, Liu et al. (2011a)采用LA-ICP-MS碎屑锆石推测其最大沉积年龄约为1848 Ma。中元古代长城系西阳河群分布于中条山东部的大片区域,岩石组合为一套中性火山岩,夹有基性火山岩和酸性火山岩的火山岩建造,其形成年龄为1800~1750 Ma(Zhao et al., 2004)。汝阳群角度不整合于西阳河群之上,主要为一套长石石英杂砂岩、石英砂岩、页岩和白云岩(图2)。宋家山群出露于垣曲县东部的宋家山—绛道沟—杜家沟一带,以“天窗”形式分布于西阳河群中,该套变质岩岩石组合变化较大,底部为绿泥角闪石岩、斜长角闪片麻岩及黑云变粒岩,中部为绢云石英片岩、白云石大理岩和石英岩,夹中基性火山岩夹层,上部为长石石英岩(白瑾等, 1997)。

2 岩石组合特征

2.1 中条群

中条群在中条山地区分布广泛,从南部的张店

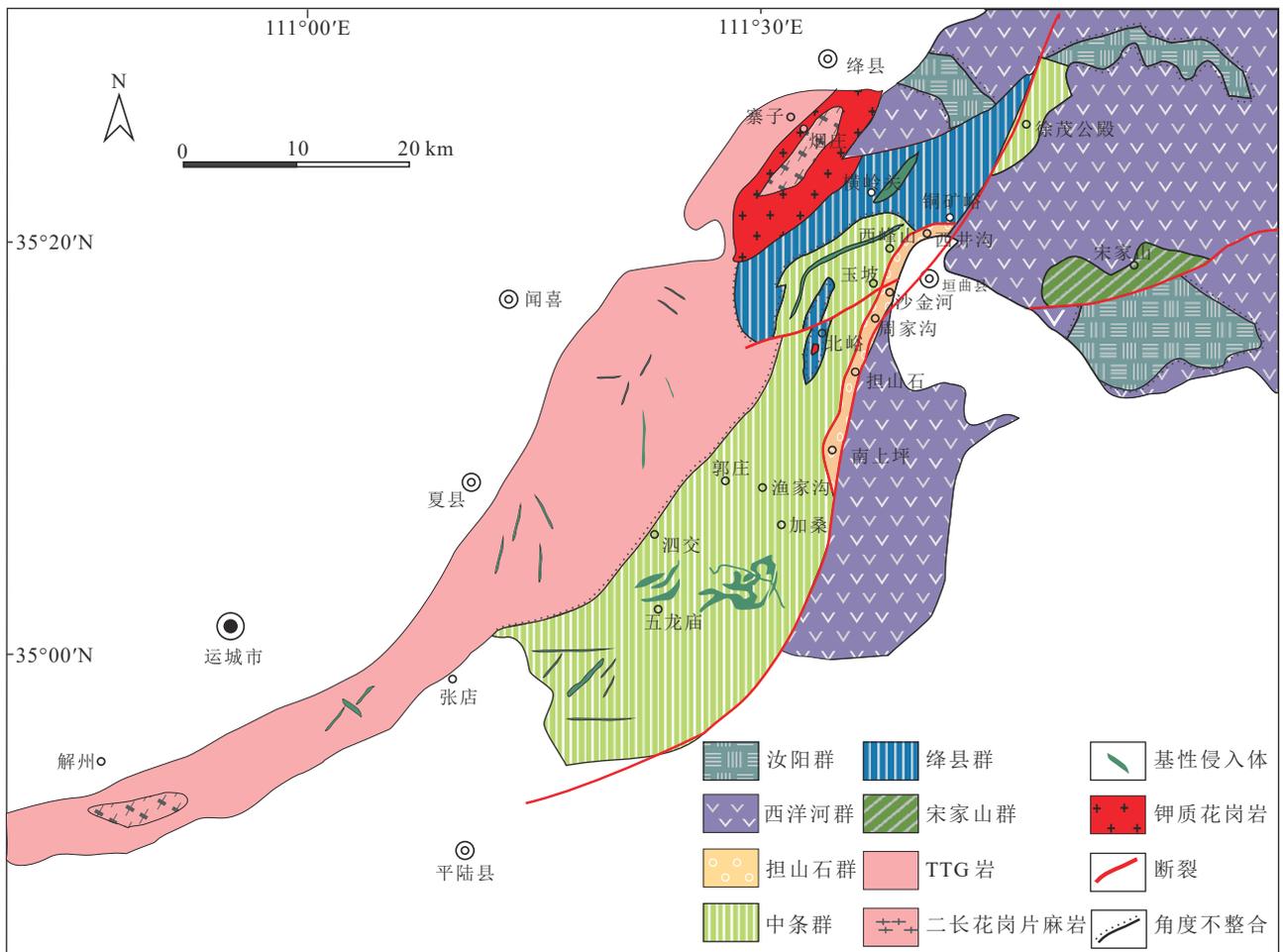


图 2 中条山地区前寒武纪岩石分布地质简图(据刘树文等, 2007; 张晗, 2012)

Fig. 2 Sketch geological map of the distribution of Precambrian rocks in Zhongtiao Mountain region

东部—五龙庙—泗交—郭庄—玉坡一直到东北部的西峰山一带, 呈北东向展布, 另外在东北部的徐茂公殿一带也有出露。中条群自下而上分为界牌梁组、龙峪组、余元下组、篦子沟组、余家山组、温峪组、吴家山组和陈家山组 8 个地层单元。本次在西峰山、玉坡、渔家沟、郭庄、泗交和五龙庙 6 个中条群出露较好的地段(图 2), 对中条群开展了详细的地质层序和岩石组合调查(图 3)。

中条群底部的界牌梁组主要出露于中条山脉北东部的西峰山和玉坡一带, 从北向南厚度减小, 西峰山最大出露厚度为 91.7 m, 玉坡附近出露厚度为 54.2 m。主体为一套变质碎屑岩, 下段为变质砾岩, 砾石成分为花岗片麻岩、长石石英岩、石英岩、角闪片麻岩等, 上段为肉红色、灰白色石英岩和绢英岩, 局部可见变余波痕和交错层理。龙峪组分布范围比界牌梁组略大, 岩性以深灰色、灰色绢云片岩为主,

南部钙质增多, 过渡为钙质绢云片岩, 下段夹薄层石英岩或砂质绢英片岩(图版 I-a), 上段夹薄层白云石大理岩(图版 I-b)。余元下组分布范围与龙峪组一致, 北西部西峰山最大出露厚度为 800 m, 南部泗交和渔家沟一带厚约 100 m, 主体为一套碳酸盐岩建造, 以白云石大理岩为主(图版 I-c), 局部含少量方柱石、透闪石和金云母。篦子沟组出露范围最大, 厚度为 200~1000 m。岩性为一套含炭泥质、半泥质、泥质粉砂岩夹透镜状碳酸盐岩建造, 下段为二云片岩、绢云片岩(图版 I-d)、石榴绢云片岩(图版 I-e)、绢英岩夹透镜状白云石大理岩, 上段为炭质片(板)岩(图版 I-f)夹透镜状白云石大理岩。余家山组分布范围和篦子沟组一致, 出露厚度为 600~2000 m, 主体为一套镁质碳酸盐岩建造, 以厚层、中厚层白云石大理岩为主(图版 I-g), 夹炭质片(板)岩, 北部夹灰褐色含铁锰质白云石大理岩, 中部玉坡一带白云石

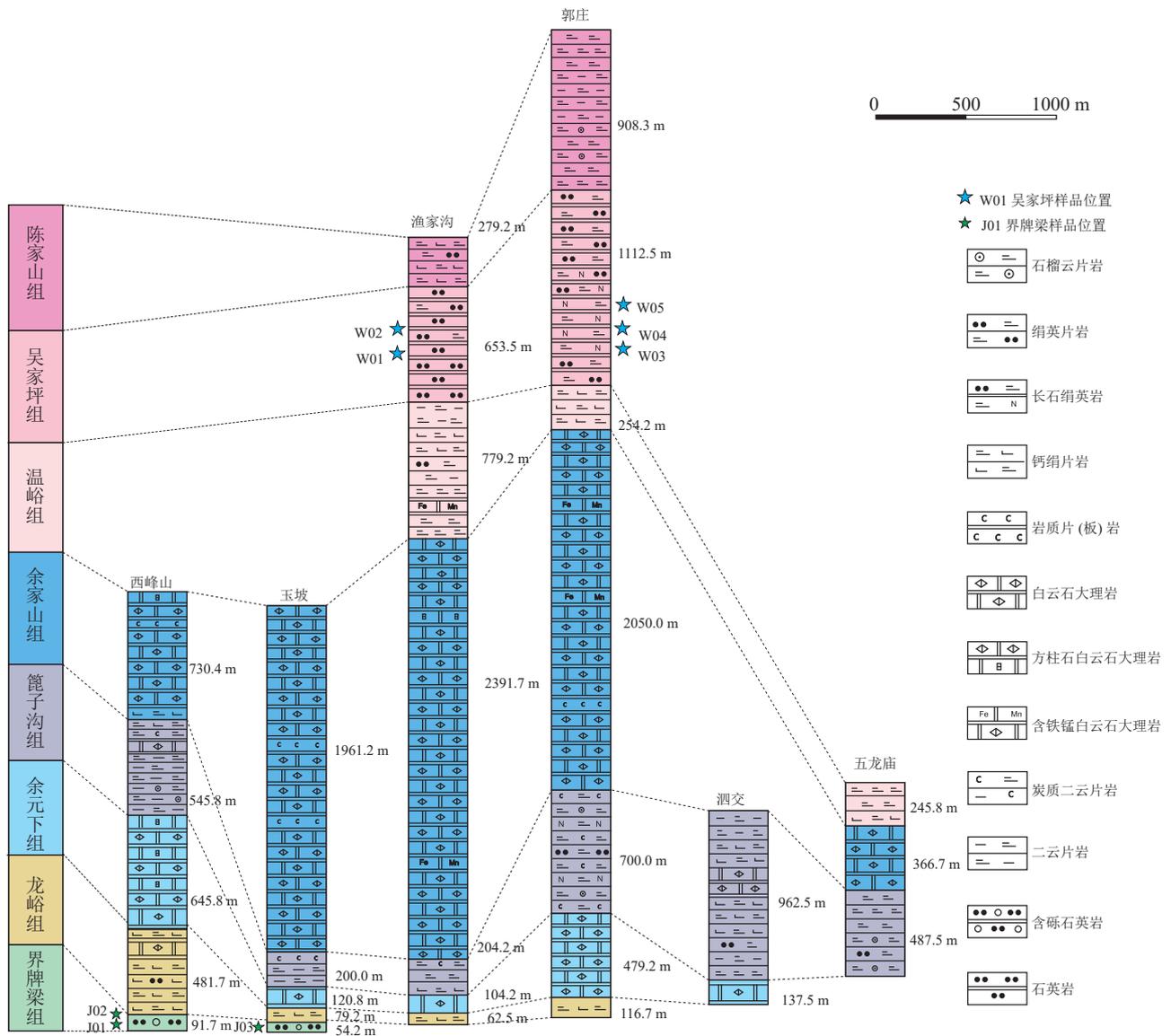


图3 中条山地区中条群地层柱状对比图

Fig. 3 Stratigraphic comparison of Zhongtiao Group in Zhongtiao Mountain region

大理岩含方柱石(图版 I -h),局部大理岩发生条带状钠长石化(图版 I -i)。温峪组分布在中部渔家沟和郭庄一带,渔家沟最大出露厚度为 779.2 m,郭庄一带厚 254.2 m。岩性二分性明显,下段为白云石大理岩夹钙质云母片岩,上段为绢云片岩。吴家坪组分布范围和渔家沟一致,主要为一套变碎屑岩建造,以中厚层绢英岩为主,次为白色、灰白色厚层石英岩。陈家山组主要分布在中部郭庄和渔家沟一带,最大出露厚度为 908.3 m,下段为石榴绢云片岩,中段为石榴二云片岩,上段为绿泥绢英片岩。

中条群变质程度为低绿片岩相—低角闪岩相,岩性以变质碎屑岩和变质碳酸盐岩为主。其中变质

碎屑岩分布在界牌梁组、龙峪组、篦子沟组、温峪组、吴家坪组和陈家山组,主要岩石类型为石英岩、钙绢片岩、绢云片岩、炭质片(板)岩、石榴绢云片岩等。保留有完好的递变层、交错层理及变余砂质、粉砂质结构。白瑾等(1997)依据岩石结构构造和化学成分对这些岩石进行了原岩恢复,其中变质砾岩和变质砂岩(石英岩)原岩分别为砾岩、成熟度较低的长石砂岩、石英砂岩、长石石英砂岩和杂砂岩;以炭质板(片)岩和各种绢云片岩为代表的变泥质和半泥质岩的原岩为与泥质、含泥粉砂岩相关的沉积岩;变质碳酸盐岩主要分布于余元下组、余家山组,另外在龙峪组、篦子沟组和温峪组也有夹层出现。主要

图版 I Plate I



a. 龙峪组下段变形的砂质绢片岩; b. 龙峪组上段薄层大理岩; c. 余元下组白云石大理岩; d. 篦子沟组下段绢云片岩; e. 篦子沟组下段石榴绢云片岩; f. 篦子沟组上段炭质板岩; g. 余家山组厚层白云石大理岩; h. 余家山组含方柱石白云石大理岩; i. 余家山组大理岩中的钠长石条带。Ab—钠长石; Dol—白云石; Grt—石榴子石; Scp—方柱石; Mb—大理岩

岩石类型有白云石大理岩、石英白云石大理岩、黑云石英白云石大理岩、钠长石英白云石大理岩、方柱白云石大理岩等,呈层状分布,变余层理发育,其原岩为白云岩、含灰白云岩和含云灰岩。

2.2 担山石群

担山石群主要分布于中条山脉北部,北起西井沟,向南经西峰山、周家沟、担山石延至南上坪,呈南北向狭长带状不整合于中条群之上。根据岩性自下而上划分为 3 个组:周家沟组、西峰山组和沙金河组。本次在西井沟、沙金河、周家沟、担山石和南上坪 5 个出露较好的地段,对担山石群开展了详细的地层层序调查对比(图 4)。

担山石群底部的周家沟组呈透镜状沿不整合面展布,出露厚度不稳定,中部余家山一带周家沟组直接与中条群中部的余家山组大理岩接触,周家沟一

带最大出露厚度为 158.6 m,南部南上坪厚度为 39.2 m,主要为一套紫红色、灰白色变质砾岩,砾石成分主要为石英岩、白云石大理岩(图版 II-a),少量为绢片岩,胶结物为铁质、硅质及同成分碎屑,砾石磨圆度、分选性均较差,多呈棱角状和次棱角状,砾径最大 60 cm,一般为 2~10 cm,局部砾石呈定向排列(图版 II-b),局部可见大理岩夹层(图版 II-c)。西峰山组出露厚度为 145~310 m,由灰白色、肉红色厚层状石英岩组成(图版 II-d),局部可见变余砂状结构和变余水平层理(图版 II-e)。沙金河组在沙金河一带最大出露厚度为 750.8 m,担山石附近为 45.1 m。岩性为互层状中厚层含砾石英岩(图版 II-f)和变质砾岩(图版 II-g),局部夹薄层大理岩(图版 II-h)。砾石成分主要为石英岩,少量大理岩,局部砾石呈定向排列,具有压扁拉长现象,上部砾石中大理岩增多

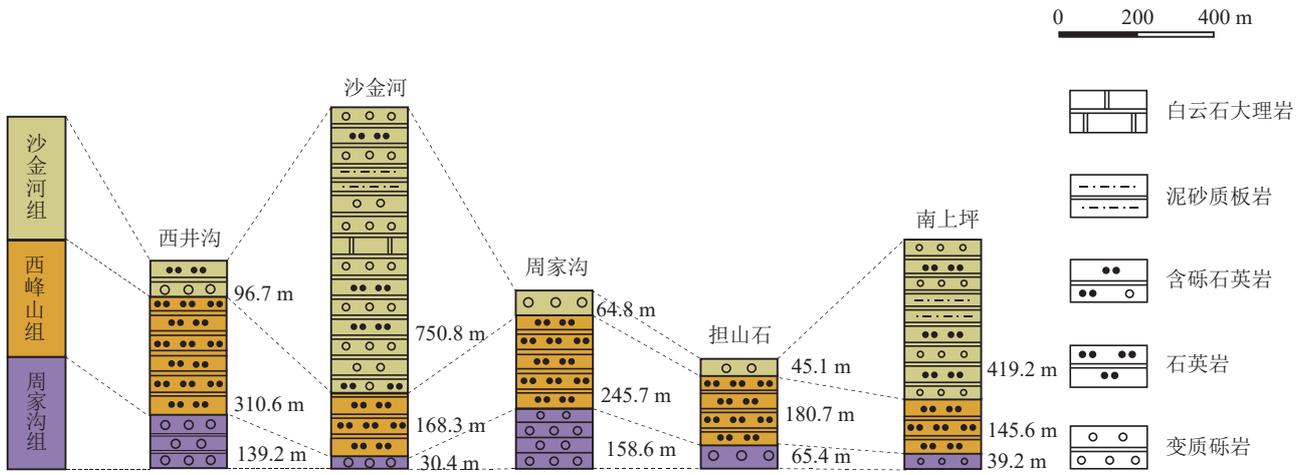
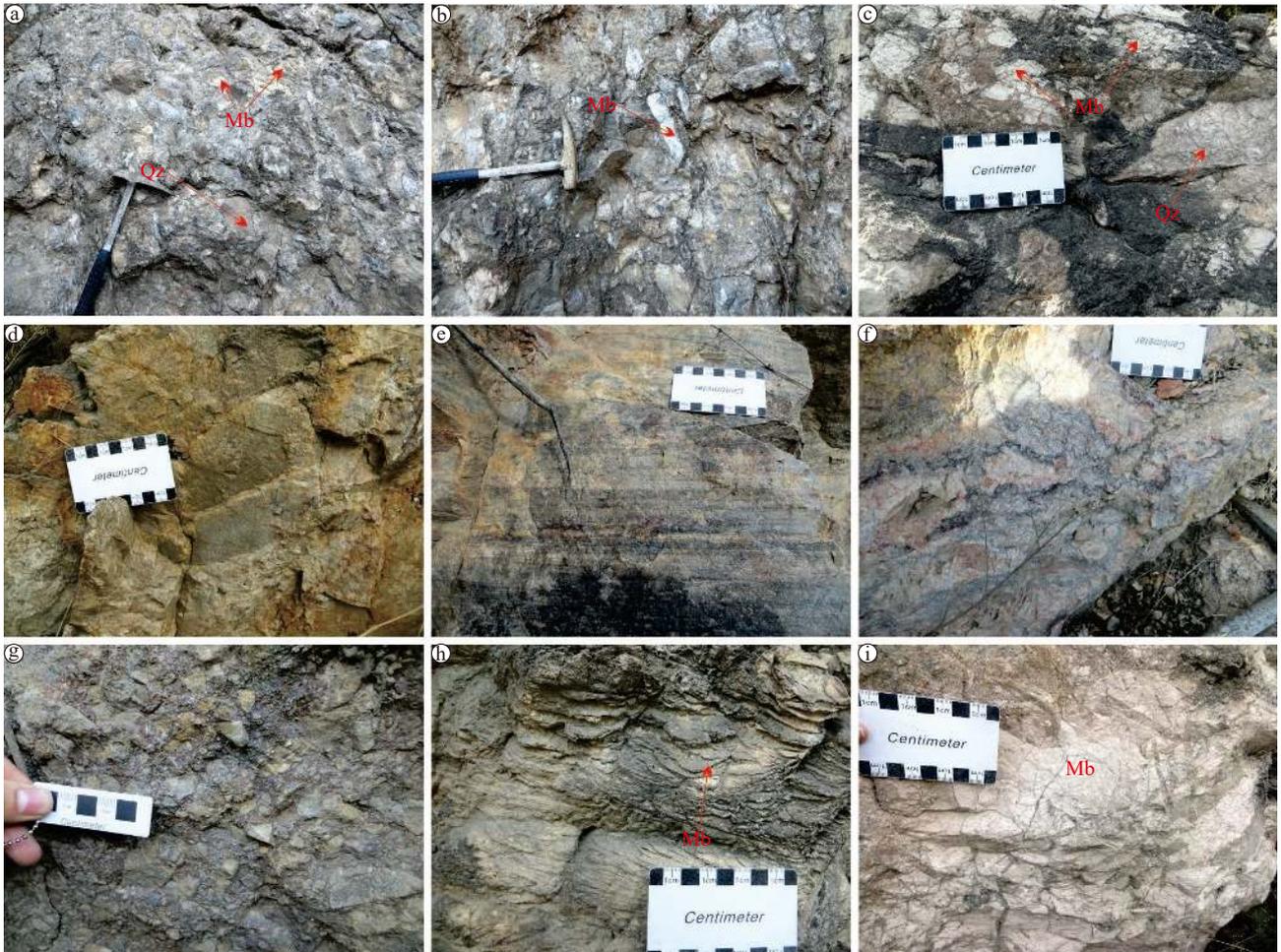


图4 中条山地区担山石群地层柱状对比图

Fig. 4 Stratigraphic comparison of Danshanshi Group in Zhongtiao Mountain region

图版 II Plate II



a.周家沟组中的石英岩和大理岩砾石; b.周家沟组定向排列的砾石; c.周家沟大理岩夹层; d.西峰山组厚层石英岩; e.西峰山组石英岩中的水平层理; f.沙金河组含砾石英岩; g.沙金河组变质砾岩; h.沙金河组薄层大理岩; i.沙金河组大理岩砾石。Mb—大理岩; Qz—石英岩

(图版 II-i), 砾石分选性差, 排列杂乱。

担山石群发生了低绿片岩相变质作用, 主要为一套变质碎屑岩, 自下而上原岩分别为砾岩—砂质碎屑岩—砂砾岩夹少量粉砂岩。其底部的周家沟组出现下部中条群的大理岩砾石, 呈次棱角状—棱角状, 分选性极差, 可能为快速堆积的产物。

3 测试方法

中条群碎屑岩主要为变质砂岩、炭质片岩、绢英岩和杂砂岩。本次共采集了 8 件样品, 其中界牌梁组 3 件, 2 件位于西峰山, 1 件位于玉坡; 吴家坪组 5 件, 2 件位于渔家沟, 3 件位于郭庄(图 3)。所有样品都选择无风化、无蚀变的新鲜岩石(表 1)。

样品碎样加工在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成, 无污染粉碎至 200 目。岩石全岩分析由国家地质实验室中心完成, 主量元素测试方法为 X 射线荧光光谱法测定, 测试仪器为飞利浦 PW2404X 射线荧光光谱仪, 微量和稀土元素利用酸溶法制备样品并用 Finningan MAT 的 HR-ICP-MS(Element I)电感耦合等离子体质谱测试。分析精度为: 当元素含量大于 10×10^{-6} 时, 精度优于 5%, 当含量小于 10×10^{-6} 时, 精度优于 10%。

4 变质砂岩地球化学特征

碎屑岩成分变化较大, SiO_2 含量为 90.02%~71.42%, Al_2O_3 含量为 15.74%~6.21%, Na_2O 含量为 0.19%~0.76%, K_2O 含量为 0.95%~3.78%(表 1)。界牌梁组石英岩(J01)的 SiO_2 含量最高, 可达 90.02%, 界牌梁组绢英岩 SiO_2 含量高于吴家坪组绢英岩, 反映了界牌梁组砂岩的成熟度高于吴家坪组; CaO 含量普遍小于 1%, 表明砂岩中钙质成分较少; 吴家坪组样品中 Al_2O_3 含量远高于界牌梁, 说明吴家坪组砂岩中粘土矿物含量增高; Na_2O 和 K_2O 含量也普遍高于界牌梁组, 较高的 K 元素含量表明砂岩中含有部分钾长石和云母类矿物。此外, Al_2O_3 与 K_2O 含量呈正相关性, 表明 Al_2O_3 与粘土矿物有关。变质砂岩中 Ba 含量较高, 普遍大于 200×10^{-6} , 说明中条群 Ba 元素富集; Cu、Mn、Ni、Co 含量也较高, 可能与中条山基底涑水杂岩中的基性和超基性岩有关; Sr 含量为 45.39×10^{-6} ~ 79.48×10^{-6} , 说明源区风化程度较低。Zr 含量为 38.46×10^{-6} ~ 96.71×10^{-6} , Hf 含量为 1.29×10^{-6} ~ 4.16×10^{-6} , 二者呈正相关, 表明砂岩中出

现一定量重矿物锆石。

5 讨论

5.1 中条群和担山石群沉积时限

中条群主体为一套碎屑岩—碳酸盐岩建造, 下部夹火山岩夹层。通过测定中条群的火山岩夹层和碎屑锆石年龄, 可以限定其沉积年龄(图 5)。孙大中等(1993)通过单颗粒锆石 U-Pb 法得到篦子沟组底部英安质凝灰岩的年龄为 2059 ± 5 Ma, 推测中条群开始沉积的年代约为 2060 Ma。刘玄等(2015)采用 SIMS 锆石 U-Pb 法对侵入篦子沟组和余元下组接触带处的斜长角闪岩进行了测年, 得到锆石 U-Pb 不一致线上交点年龄为 2086 ± 68 Ma, 结合篦子沟组英安质凝灰岩 2059 ± 5 Ma 的年龄(孙大中等, 1993), 认为中条群的形成晚于 2090~2060 Ma。Meng et al.(2021)采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法测得中条群篦子沟组底部基性火山岩夹层的年龄约为 2088 Ma。Li et al.(2011)对中条群底部界牌梁组长石石英岩中的碎屑锆石进行了 LA-ICP-MS 测年, 获得年龄为 2132~2784 Ma, 限定中条群的形成时代在 2100 Ma 之后。Liu et al.(2011a)采用 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 法测得中条群界牌梁组石英岩和陈家山组绢云母石英岩的最小年龄分别为 2165 Ma 和 1848 Ma, 限定中条群形成于 2160~1850 Ma。杨崇辉等(2018)对中条群底部界牌梁组石英岩进行了 LA-ICP-MS 锆石测年, 得到最小年龄为 2453 Ma, 同时对篦子沟组中的酸性火山岩进行了 SHRIMP U-Pb 锆石测年, 得到年龄为 2139 ± 10 Ma, 从而限定中条群年龄大致始于 2140 Ma。刘玄等(2015)和杨崇辉等(2018)根据碎屑锆石和侵入岩年龄, 把中条群下伏绛县群的年龄限定在 2200~2140 Ma, 该年龄数据与中条群的最大沉积年龄 2140 Ma 吻合。界牌梁组位于中条群底部不整合之上, 其最年轻的碎屑锆石年龄大致可以代表中条群开始沉积的年龄。综合这些年龄数据, 大致可以将中条群开始沉积的年龄限定在 2.1 Ga 左右。

担山石群主要为一套磨拉石建造, Liu et al.(2011a)通过碎屑锆石测年, 限定其最大沉积年龄约为 1848 Ma。担山石群被西洋河群(能耳群)火山岩不整合覆盖, 赵太平等(2015)通过综合研究, 认为西洋河群形成于 1800~1750 Ma。综合这些数据, 可以将担山石群开始沉积年龄限定在 1.85 Ga 左右。

表1 中条群碎屑岩主量、微量和稀土元素测试数据

Table 1 Test data of major, trace and rare earth elements of clastic rocks in Zhongtiao Group

元素	J01	J02	J03	W01	W02	W03	W04	W05
	界牌梁组 石英岩	界牌梁组 绢英岩	界牌梁组 绢英岩	吴家坪组 绢英岩	吴家坪组 绢英岩	吴家坪组 绢英岩	吴家坪组 绢英岩	吴家坪组 绢英岩
SiO ₂	90.02	83.69	84.24	73.28	72.43	74.12	71.42	72.65
TiO ₂	0.42	0.38	0.41	0.56	0.59	0.71	0.68	0.69
Al ₂ O ₃	6.21	7.78	6.95	15.21	16.84	14.92	14.73	15.74
Fe ₂ O ₃	1.44	1.52	1.39	3.41	2.43	3.61	2.54	4.39
FeO	0.32	0.43	0.17	0.52	0.71	0.35	0.46	0.19
MnO	0.02	0.07	0.06	0.02	0.01	0.04	0.03	0.02
MgO	0.76	0.69	0.72	1.93	1.88	1.79	2.01	2.96
CaO	0.31	0.65	0.48	0.35	0.29	0.31	0.78	0.43
Na ₂ O	0.23	0.19	0.27	0.19	0.41	0.46	0.76	0.23
K ₂ O	0.95	2.15	2.47	2.65	2.57	2.04	3.78	2.44
P ₂ O ₅	0.03	0.01	0.03	0.04	0.09	0.01	0.01	0.01
烧失量	1.21	2.11	2.31	2.83	2.78	1.68	3.02	1.94
总计	101.92	99.67	99.5	100.99	101.03	100.04	100.22	101.69
Cu	72.5	78.5	67.4	56.3	47.3	52.3	47.8	38.6
Ni	3.4	1.5	1.8	3.2	2.7	1.6	3.7	4.1
La	26.01	45.88	43.65	36.51	26.63	31.77	57.32	48.96
Ce	49.25	92.06	113.3	60.33	42.65	58.45	65.98	72.45
Pr	3.2	3.14	2.16	4.59	4.51	6.41	3.56	2.79
Nd	20.42	37.18	38.43	31.69	36.73	29.06	54.71	46.87
Sm	3.56	4.78	7.62	2.8	2.43	4.27	4.78	6.54
Eu	0.74	1.29	1.67	0.4	0.43	0.58	0.96	0.65
Gd	2.39	4.36	7.03	4.43	1.98	2.55	4.77	6.87
Tb	0.36	0.54	0.91	0.08	0.36	0.35	0.98	0.64
Dy	2.57	3.67	6.56	2.46	1.54	1.33	2.01	4.78
Ho	0.14	0.13	0.44	0.12	0.19	0.24	0.43	0.09
Er	2.76	3.82	3.67	2.28	1.55	3.67	4.31	3.78
Tm	0.01	0.04	0.06	0.04	0.04	0.07	0.06	0.03
Yb	1.93	2.89	3.59	1.28	1.36	1.49	1.94	1.78
Lu	0.23	0.44	0.55	0.14	0.29	0.34	0.41	0.33
Sr	71.81	78.31	76.23	75.23	45.39	72.47	79.43	79.48
Ba	342	241	442	223	243	232	446	379
Th	8.47	19.71	17.29	19.28	11.48	17.53	17.87	16.49
Zr	46.73	55.51	75.43	65.33	96.71	38.46	77.49	79.56
Hf	1.29	3.57	4.16	1.76	1.57	1.03	2.03	1.56
Y	18.64	14.57	31.26	12.46	13.76	14.58	13.78	14.12
Sc	8.62	10.59	20.41	9.88	1.65	0.89	4.56	7.63
Cr	58.41	92.31	83.16	310.33	103.36	110.3	145.78	147.68
Co	3.96	6.39	9.01	0.98	0.51	0.84	1.75	1.45
V	5.89	10.14	9.81	9.66	13.26	6.87	8.77	9.43

注: 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为10⁻⁶

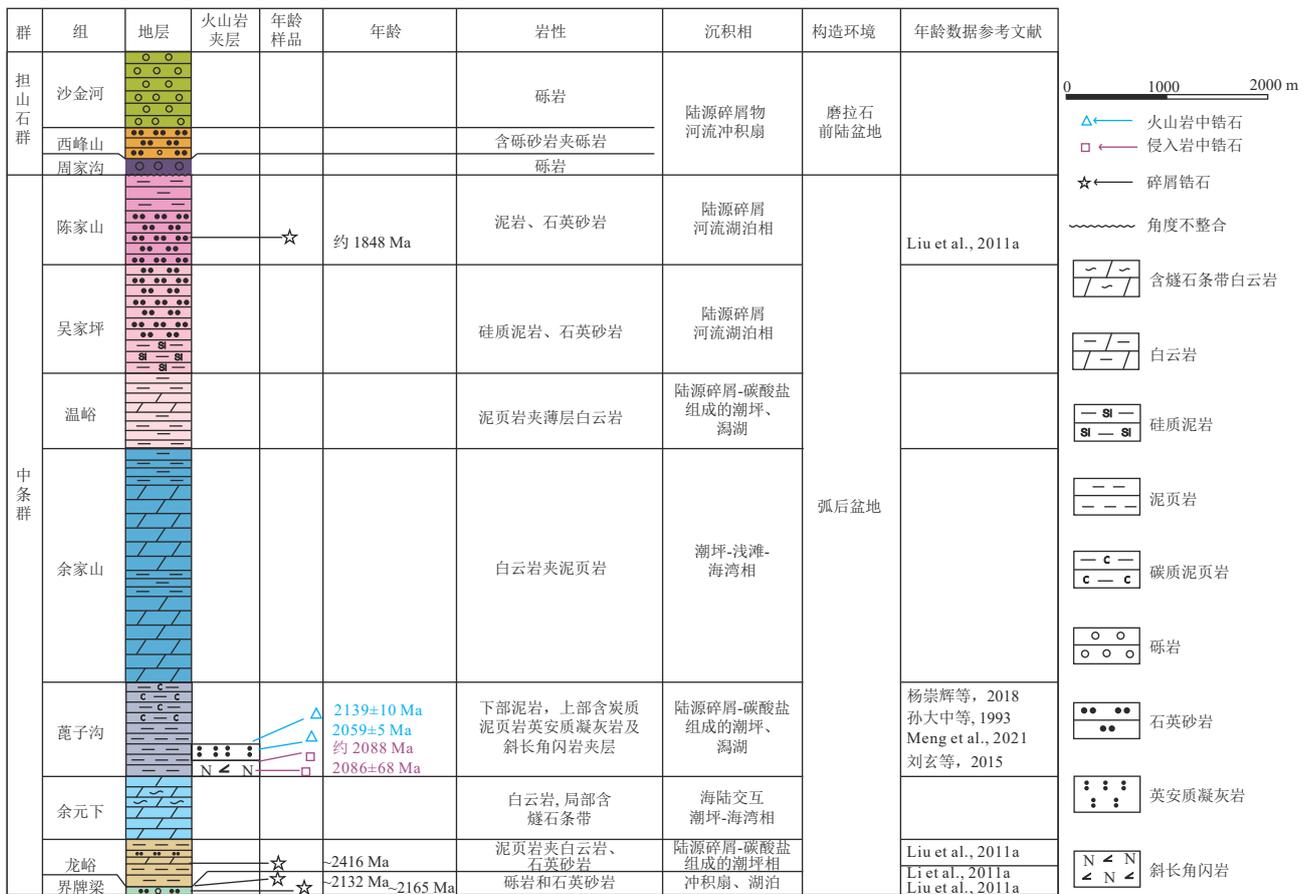


图 5 中条群和担山石群地层沉积相和构造环境

Fig. 5 Sedimentary facies and tectonic setting of the Zhongtiao Group and Danshanshi Group

5.2 中条群和担山石群沉积环境及构造环境

中条群底部界牌梁组为砾岩、长石石英砂岩和杂砂岩组成的陆源粗碎屑岩, 发育变余波痕和交错层理, 沉积相为大陆相区的冲积扇和湖泊相。龙峪组为长石石英砂岩-钙泥质岩-镁质碳酸盐岩组成的沉积韵律层, 反映了强弱交替出现的水动力条件, 表明龙峪组为陆块边缘潮坪相沉积的产物。余元下组陆源碎屑补给急剧减少, 形成了镁质碳酸盐岩沉积, 含波状、丘状叠层石, 形成于潮坪—海湾相沉积环境。从界牌梁组、龙峪组到余元下组, 岩石粒级由粗变细, 陆源碎屑物减少, 反映了一个完整的海进沉积旋回, 沉积环境由陆相转变为海陆过渡相。篦子沟组下部为潮坪相半泥质岩夹镁质碳酸盐岩沉积, 上部为潟湖相炭质丰富的泥质岩沉积, 陆源碎屑物补给由少变多。余家山组陆源碎屑物质补给大量减少, 形成厚层镁质碳酸盐岩夹少量泥质沉积, 代表潮坪相和浅滩沉积环境。篦子沟和余家山组反映了一个不完整的海进沉积旋回。进入温峪组, 陆源碎屑

物含量再次增多, 下部钙绢片岩夹白云石大理岩, 上部为绢片岩和绢英片岩, 吴家坪组和陈家山组为泥质碎屑岩建造, 沉积环境再次变为陆相湖泊或潟湖相。整个中条群为一套由碎屑岩-泥质岩-碳酸盐岩组成的多旋回沉积建造, 主体为一套大陆边缘的浅水、潮坪沉积为主, 潟湖、海湾、浅滩沉积次之的沉积环境。

中条群变质砂岩 SiO₂ 含量为 71.42%~90.02%, 平均 77.73%, 原岩多为成熟度较低的长石砂岩、岩屑砂岩。变质砂岩样品中石英含量变化明显, 底部界牌梁组变质砂岩的 SiO₂ 含量明显高于吴家坪组, 说明界牌梁组砂岩的成熟度更高, 构造环境相对稳定。Al₂O₃ 含量为 6.21%~15.74%, 平均 2.29%; Fe₂O₃ 含量为 1.44%~4.39%, 平均 2.59%; FeO 含量为 0.17%~0.71%, 平均 0.39%; 在碎屑岩 (TFe₂O₃+MgO)-TiO₂ 图解(图 6)和 (TFe₂O₃+MgO)-Al₂O₃/SiO₂ 图解(图 7)中, 中条群底部界牌梁组成熟度高的砂岩落入被动大陆边缘靠近活动大陆区域, 而上部

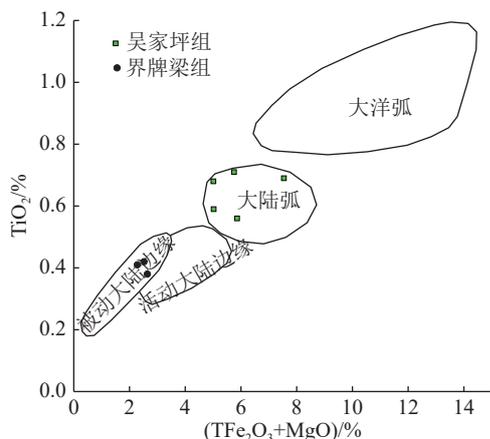


图6 中条群变质砂岩的(TFeO+MgO)-TiO₂判别图解(据 Bhatia, 1983)

Fig. 6 Tectonic (TFe₂O₃+MgO)-TiO₂ discrimination diagram of metasandstone in the Zhongtiao Group

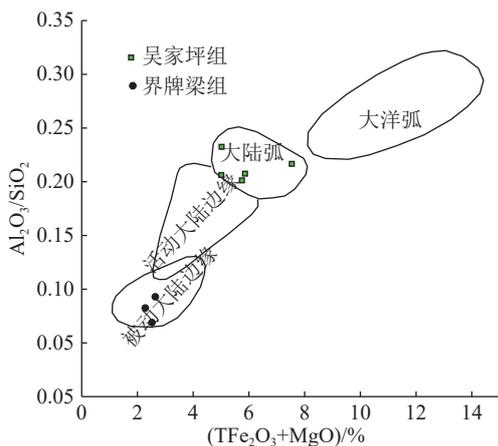


图7 中条群变质砂岩的(TFe₂O₃+MgO)-Al₂O₃/SiO₂判别图解

Fig. 7 Tectonic (TFe₂O₃+MgO)-Al₂O₃/SiO₂ discrimination diagram of metasandstone in the Zhongtiao Group

吴家坪成熟度低的变质砂岩落入大陆弧环境,说明中条群沉积环境由早期相对稳定转变为后期较活动的环境。中条群篦子沟组和余元下组之间夹有变质基性火山岩一次火山岩和变质酸性火山岩,变质基性火山岩一次火山岩的SiO₂含量为45%~53%,成分为拉斑玄武岩系列,变质酸性火山岩为英安岩和流纹岩,属低钾—中钾的富钠质钙碱性岩系,二者的化学特征显示大陆边缘弧特征(白瑾等, 1997)。刘超辉等(2012)对中条群碎屑锆石进行了研究,发现其与典型的弧后盆地沉积十分相似,碎屑物主要来自本地和与弧相关的火山岩。此外,白瑾等(1997)对中条群下伏绛县群进行了研究,发现绛县群杂砂岩

具有较高的Zr/Th值,较低的Ba、Rb、Sr含量和Ti/Zr值,具有大陆岛弧环境的特征。绛县群变质火山岩在地球化学构造环境判别图解上落入大陆边缘钙碱性玄武岩区及其附近,同时期的铜矿峪花岗斑岩和石英二长斑岩也显示出活动大陆边缘的构造环境,从而认为中条群的构造环境为活动大陆边缘。此外,杨崇辉等(2018)基于大量地球化学和年代学数据发现,华北克拉通的豫西南、中条山、吕梁山等地区普遍发育约2.3 Ga的岩浆活动,具有活动大陆边缘的特征,推测鲁山—华山—中条山—吕梁山一带存在古元古代早期的岛弧与活动大陆边缘的相互作用,进而在古元古代中期(2.2 Ga)华北克拉通进入伸展过程,形成大量的火山-沉积岩系。这一过程的火山-沉积岩系在中条山地区表现为中条群碎屑岩-碳酸盐岩夹火山岩建造。总之,中条群为大陆边缘的浅水、潮坪环境沉积的一套碎屑岩-碳酸盐岩多旋回建造,夹有与活动大陆边缘弧有关的变质基性火山岩一次火山岩和变质酸性火山岩,中条群的构造环境很可能为与活动大陆边缘有关的弧后盆地。

碎屑锆石除能限定地层的沉积时限外,还可以反映沉积物的源区特征。Liu et al.(2011a)通过大量的碎屑锆石研究发现,中条群碎屑岩的主要源区为中部造山带与弧有关的岩石,次要源区为东部陆块中太古代和古太古代的古老克拉通基底岩石。Li et al.(2011)对中条群底部界牌梁组长石石英岩和篦子沟组的长石石英岩及片岩碎屑锆石进行了研究,认为其源区特征也具有相似的二元源区,推测其沉积环境为东部陆块西缘的弧后盆地。此外,Liu et al.(2011b, c)对中部造山带与中条群层位对应的五台山地区滹沱群和吕梁山地区野鸡山群进行了碎屑锆石研究,也发现相似的源区特征,即中部造山恒山-五台-阜平带内的新太古代TTG片麻岩和古元古代花岗岩为滹沱群的主要源区,吕梁杂岩中的新太古代—古元古代花岗岩是野鸡山群的主要源区,在二者的碎屑锆石中都发现了老于3.1 Ga年龄的锆石,目前整个华北克拉通只在东部陆块发现老于3.1 Ga的锆石。这样一个与弧相关的岩石组合和下伏克拉通基底的二元源区组合,除指示典型的弧后盆地特征外,还间接证明这个弧后盆地很可能发育在东部陆块西缘,即中条群早期的构造环境很可能为东部陆块西缘的弧后盆地。

担山石群为典型陆源碎屑物快速堆积的产物,

主要由陆相粗碎屑物组成, 包括砾岩、含砾砂岩和砂岩, 砾石中含有大量的中条群碎块, 沉积相以河流相冲积扇为主, 形成于新生山体快速隆升和剥蚀的条件, 具有典型磨拉石特征。侯泉林等(2018)对磨拉石记录的造山带相关信息和演变过程进行了系统总结, 认为磨拉石(molasse)可以形成于碰撞造山阶段的前陆磨拉石盆地、造山带核心磨拉石盆地、后陆磨拉石盆地等构造环境, 也可以形成于俯冲造山阶段的弧背前陆盆地。虽然一个完整的碰撞造山带可以保存已变形的俯冲阶段的磨拉石, 但是担山石群磨拉石叠加在中条群弧后盆地之上, 结合担山石群磨拉石的沉积年龄, 其构造环境应为与碰撞造山作用有关的周缘前陆盆地。担山石群开始沉积的年龄代表了碰撞造山作用的开始。主要证据如下。

(1)前陆盆地中磨拉石主要来自下伏地层, 岩石以富含石英、岩屑, 贫长石的陆相粗碎屑为主, 这与担山石群的岩石特征吻合; 以变质砾岩为主, 砾石成分主要为中条群的岩石碎块, 局部夹有中条群大理岩块, 余家山附近担山石群底部的周家沟组砾岩直接不整合于中条群中部的余家山组大理岩之上。刘超辉等(2012)通过碎屑锆石研究发现, 担山石群的碎屑物质来自中部造山带与弧有关的岩石。这一特征与典型的 Grenville 造山带前陆盆地一致(Krabbendam et al., 2008)。

(2)从弧后盆地到前陆盆地构造相的转变, 可以从中部造山带和担山石群之间的不整合面得到佐证。

(3)前陆盆地的磨拉石一般下部颗粒细、上部颗粒粗, 中条群上部的温峪组、吴家山组和陈家山组为一套细碎屑岩, 岩性以石英岩和绢英岩为主, 代表了从弧后盆地到前陆盆地磨拉石的转变, 而担山石群以变质砾岩为主的粗碎屑岩形成于主造山阶段的周缘前陆盆地。

(4)刘树文等(2007)利用独居石电子探针 Th-U-Pb 法对中条山地区的花岗质片麻岩进行了分析, 获得 1884.7 ± 1 Ma 和 1849.99 ± 0.63 Ma 的变质年龄, 确定中条山地区存在 1885~1850 Ma 的构造热事件。Qiu et al.(2017)采用 LA-ICP-MS 方法对中条山地区变质独居石进行了 U-Pb 定年, 也确定了变质时代约为 1862 Ma 的热液活动事件。这与担山石群不整合面代表的构造事件相吻合, 说明中条山地区存在约为 1.85 Ga 的构造事件。

(5)肖玲玲等(2015)系统总结了华北克拉通中

部造山变质作用、变质年龄和 $P-T-t$ 轨迹演化特征, 发现中部带变质杂岩中至少记录了 1.85 Ga、1.95 Ga、2.5 Ga 三组变质年龄, 其中 1.85 Ga 的变质年龄占据主导地位(图 8), 说明在中部带内 1.85 Ga 的变质事件具有广泛性和普遍性, 前期形成的各种地层和岩石都经历了该期变质作用改造。赵国春(2009)研究发现, 华北中部带为一条典型的陆-陆碰撞带, 具有近等温降压型(ITD)的顺时针变质作用 $P-T$ 轨迹, 1.85 Ga 西部陆块向东俯冲与东部陆块发生陆-陆碰撞拼合, 形成统一的华北克拉通早前寒武纪基底。这一年龄与担山石群的开始沉积年龄(约 1848 Ma)完全耦合。

5.3 中条山地区古元古代盆地演化

讨论中条山古元古代盆地演化, 必须立足于华北克拉通中部碰撞造山带这个前提, 即东部陆块和西部陆块在约 1.85 Ga 沿中部造山带发生碰撞, 形成统一的克拉通基底。早期俯冲阶段形成的各种构造体, 在碰撞阶段转化成碰撞造山带的一部分。结合中条群、担山石群的沉积构造环境、岩石地球化学特征、形成年龄和源区特征, 笔者提出中条山地区古元古代构造盆地演化的初步模型。

最初中条山地区为东部陆块西缘大陆边缘弧的一部分, 2.1 Ga 前后, 西部陆块的前导洋壳向东部陆块活动大陆边缘之下持续俯冲, 东部陆块岩浆弧之后由于拉张作用发展出弧后盆地体系, 弧后盆地沉积了中条群碎屑岩-碳酸盐岩建造, 沉积物大多来自岩浆弧, 沉积过程伴有岩浆作用, 部分喷发出地表, 形成基性侵入岩和英安质凝灰岩。随着俯冲作用的

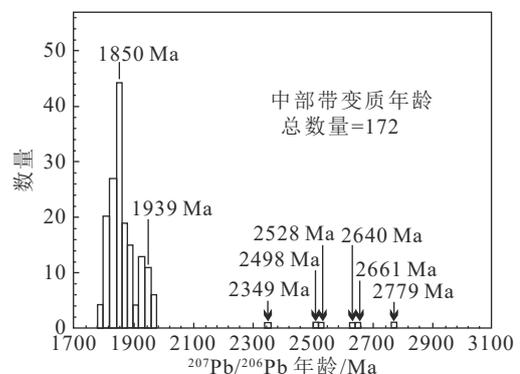


图 8 华北克拉通中部造山带不同变质杂岩变质年龄频度分布图(据肖玲玲等, 2015)

Fig. 8 Metamorphic age histogram of rocks from the metamorphic complexes in the Trans-North China Orogen

进行, 1.85 Ga 前后, 东部陆块与西部陆块之间的大洋闭合, 碰撞作用开始, 大规模的逆冲断层、褶皱和韧性剪切作用导致地壳不同程度地缩短和加厚, 为周缘前陆盆地的形成创造了条件, 前期形成的中条群发生挤压褶皱变形, 随后弹性下弯, 快速抬升和剥蚀, 为前陆盆地形成提供了大量的粗碎屑物源, 周缘前陆盆地中沉积了担山石群磨拉石。

6 结 论

(1) 华北克拉通中部造山带南部中条山地区古元古代中条群为一套由粗碎屑岩-泥质岩-碳酸盐岩组成的多旋回沉积岩, 变质砂岩地球化学特征显示, 中条群经历了早期相对稳定到后期较活跃的转变。根据碎屑锆石年龄、源区特征和火山岩夹层年龄得出, 中条群形成于 2.1 Ga 左右的活动大陆边缘弧后盆地。担山石群为一套砾岩-砂岩组成的磨拉石建造, 碎屑锆石年龄显示, 担山石群形成于 1.85 Ga 左右的碰撞造山阶段的前陆盆地。

(2) 中条山地区古元古代盆地演化模式为, 约 2.1 Ga 开始, 西部陆块的前导洋向东部陆块活动大陆边缘之下持续俯冲, 东部陆块西缘活动大陆边缘弧后盆地沉积了中条群, 约 1.85 Ga 开始, 东部陆块与西部陆块之间的大洋闭合, 陆陆碰撞开始, 中条群发生挤压褶皱变形, 陆壳加厚及随后的快速抬升和剥蚀形成前陆盆地中的担山石群磨拉石。中条山地区古元古代弧后盆地向前陆盆地的转化支持华北克拉通最初西部陆块向东俯冲, 经历了约 1.85 Ga 的东、西陆块碰撞并最终克拉通化的演化模式。

致谢: 感谢审稿专家提出的诸多宝贵意见和建议, 感谢国家地质实验室中心在分析测试过程中给予的帮助。

参考文献

- Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones [J]. *Jour. Geol.*, 91(4): 611-627.
- Faure M, Trap P, Lin W, et al. 2007. Polyorogenic evolution of the Paleoproterozoic Trans-North China Belt: New insights from the Luliangshan-Hengshan-Wutaishan and Fuping massifs [J]. *Episodes*, 30: 96-107.
- Krabbendam M, Prave T, Cheer D. 2008. A fluvial origin for the Neoproterozoic Morar Group, NW Scotland: Implications for Torridon Morar Group correlation and the Grenville Orogen foreland basin [J]. *Journal of the Geological Society*, 165: 379-394.
- Kusky T M, Li J H. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22: 383-397.
- Li Q, Liu S, Wang Z, et al. 2011. Provenance and geotectonic setting of the Palaeoproterozoic Zhongtiao Group and implications for assembly of the North China Craton: Whole-rock geochemistry and detrital zircon data [J]. *Journal of the Geological Society*, 168(5): 1215-1224.
- Li S Z, Zhao G C. 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaoji granitoids: Constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt in the Eastern Block of the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 158: 1-16.
- Liu C H, Zhao G C, Sun M, et al. 2011a. U-Pb geochronology and Hf isotope geochemistry of detrital zircons from the Zhongtiao complex: Constraints on the tectonic evolution of the Trans-North China Orogen [J]. *Precambrian Research*, 222: 159-172.
- Liu C H, Zhao G C, Sun M, et al. 2011b. U-Pb and Hf isotopic study of detrital zircons from the Hutuo Group in the Trans-North China Orogen and tectonic implications [J]. *Gondwana Research*, 20(1): 106-121.
- Liu C H, Zhao G C, Sun M, et al. 2011c. U-Pb and Hf isotopic study of detrital zircons from the Yejiashan Group of the Lüliang complex: Constraints on the timing of collision between the Eastern and Western Blocks, North China Craton [J]. *Sedimentary Geology*, 236(1/2): 129-140.
- Liu X, Fan H R, Santosh M, et al. 2016a. Geological and geochronological constraints on the genesis of the giant Tongkuangyu Cu deposit (Palaeoproterozoic), North China Craton [J]. *Int. Geol. Rev.*, 58: 155-170.
- Liu X, Fan H R, Yang K F, et al. 2016b. Geochronology, redox-state and origin of the ore-hosting porphyry in the Tongkuangyu Cu deposit, North China Craton: Implications for metallogenesis and tectonic evolution [J]. *Precambrian Research*, 276: 211-232.
- Meng X Y, Richards J P, Mao J W, et al. 2020. The Tongkuangyu Cu Deposit, Trans-North China Orogen: A metamorphosed Paleoproterozoic porphyry Cu deposit [J]. *Economic Geology*, 115(1): 51-77.
- Meng X Y, Kontak D J, Richards, J P, et al. 2021. Uncovering the missing magmatic link for the Tongkuangyu porphyry Cu deposit, Trans-North China Orogen: Implication for porphyry Cu deposit model and exploration [J]. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 24(1): 121-135.
- Peng P, Zhai, M G, Ernst R E, et al. 2008. A 1.78 Ga large igneous province in the North China Craton: The Xiong'er volcanic province and the North China dyke swarm [J]. *Lithos*, 101: 260-280.
- Qiu Z J, Fan H R, Liu X, et al. 2016. Mineralogy, chalcopyrite Re-Os geochronology and sulfur isotope of the Hujiaiyu Cu deposit in the Zhongtiao Mountains, North China Craton: Implications for a Paleoproterozoic metamorphogenic copper mineralization [J]. *Ore Geology Reviews*, 78: 252-267.
- Qiu Z J, Fan H R, Liu X, et al. 2017. Metamorphic P-T-t evolution of Paleoproterozoic schist-hosted Cu deposits in the Zhongtiao Mountains, North China Craton: Retrograde ore formation during

- sluggish exhumation[J]. *Precambrian Research*, 300: 59–77.
- Rogers J W, Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent[J]. *Gondwana Research*, 5: 5–22.
- Tian W, Liu S W, Zhang H F. 2006. Paleoproterozoic potassic granitoids in the Sushui complex from the Zhongtiao Mountains, Northern China: Geochronology, geochemistry and petrogenesis[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 80: 875–885.
- Xia X P, Sun M, Zhao G C, et al. 2009. Detrital zircon U–Pb age and Hf isotope study of the khondalite in Trans–North China Orogen and its tectonic significance[J]. *Geological Magazine*, 146: 701–716.
- Yu S Q, Liu S W, Tian W, et al. 2006. SHRIMP zircon U–Pb chronology and geochemical of the Henglingguan and Beiyu granitoids in the Zhongtiao Mountains, Shanxi Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80: 912–922.
- Yuan L L, Zhang X H, Yang Z L, et al. 2017. Paleoproterozoic Alaskan–type ultramafic–mafic intrusions in the Zhongtiao Mountain region, North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Precambrian Research*, 296: 39–61.
- Zhang J, Zhao G C, Sun M, et al. 2006. High–pressure mafic granulites in the Trans–North China Orogen: Tectonic significance and age[J]. *Gondwana Research*, 9: 349–362.
- Zhang J, Zhao G C, Li S Z, et al. 2007. Deformation history of the Hengshan Complex: Implications for the tectonic evolution of the Trans–North China Orogen[J]. *Journal of Structural Geology*, 29: 933–949.
- Zhang J, Zhao G C, Li S Z, et al. 2009. Deformational history of the Fuping Complex and new U–Th–Pb geochronological constraints: Implications for the tectonic evolution of the Trans–North China Orogen[J]. *Journal of Structural Geology*, 31: 177–193.
- Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. 2002. Review of global 2.1–1.8 Ga orogens: Implications for a pre–Rodinia supercontinent[J]. *Earth–Science Reviews*, 59: 125–162.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. 2003. Assembly, accretion and breakup of the Pale–Mesoproterozoic Columbia supercontinent: Records in the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 6: 417–434.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. 2004. A Pale–Mesoproterozoic supercontinent: Assembly, growth and breakup[J]. *Earth–Science Reviews*, 67: 91–123.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 136: 177–202.
- Zhao G C, Wilde S A, Guo J H, et al. 2010. Single zircon grains record two Paleoproterozoic collisional events in the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 177: 266–276.
- Zhao G C, Li S Z, Sun M, et al. 2011. Assembly, accretion, and break–up of the Palaeo–Mesoproterozoic Columbia supercontinent: record in the North China Craton[J]. *International Geology Review*, 53: 1331–1356.
- Zhao G C. 2016. Assembly, Accretion and Break–up of the Pale–Mesoproterozoic Columbia (Nuna) supercontinent: Records in the North China Craton[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 90(S1): 50.
- 白瑾, 致信, 颜耀阳, 等. 1997. 中条山前寒武纪地质[M]. 天津: 天津科学技术出版社: 1–143.
- 耿元生, 沈其韩, 任留东. 2010. 华北克拉通晚太古代末—古元古代初的岩浆事件及构造热体制[J]. *岩石学报*, 26(7): 1945–1966.
- 郭丽爽, 刘树文, 刘玉琳, 等. 2008. 中条山涑水杂岩中 TTG 片麻岩的锆石 Hf 同位素特征及其形成环境[J]. *岩石学报*, 24(1): 139–148.
- 侯泉林, 郭谦谦, 方爱民. 2018. 造山带研究中有关复理石和磨拉石的几个问题[J]. *岩石学报*, 34(7): 1885–1896.
- 胡国辉, 胡俊良, 陈伟, 等. 2010. 华北克拉通南缘中条山—嵩山地区 1.78Ga 基性岩墙群的地球化学特征及构造环境[J]. *岩石学报*, 26: 1563–1576.
- 李宁波, 罗勇, 郭双龙, 等. 2013. 中条山铜矿峪变石英英二长斑岩的锆石 U–Pb 年龄和 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 29(7): 2416–2424.
- 李秋根, 刘树文, 王宗起, 等. 2008. 中条山绛县群碎屑锆石 LA–ICP–MS U–Pb 测年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 24(6): 1359–1368.
- 李三忠, 李玺瑶, 戴黎明, 等. 2015. 前寒武纪地球动力学 (VI): 华北克拉通形成[J]. *地学前缘*, 22(6): 77–96.
- 李三忠, 赵国春, 孙敏. 2016. 华北克拉通早元古代拼合与 Columbia 超大陆形成研究进展[J]. *科学通报*, 61: 919–925.
- 刘超辉, 刘福来, 赵国春. 2012. 华北克拉通中部造山带早元古代盆地演化[J]. *岩石学报*, 28: 2770–2784.
- 刘树文, 张臣, 刘超辉, 等. 2007. 中条山—吕梁山前寒武纪变质杂岩的独居石电子探针定年研究[J]. *地学前缘*, (1): 64–74.
- 刘玄, 范宏瑞, 邱正杰, 等. 2015. 中条山地区绛县群和中条群沉积时限: 夹层斜长角闪岩 SIMS 锆石 U–Pb 年代学证据[J]. *岩石学报*, 31(6): 1564–1572.
- 陆松年, 杨春亮, 李怀坤, 等. 2002. 华北古大陆与哥伦比亚超大陆[J]. *地学前缘*, (4): 225–233.
- 邱正杰, 范宏瑞, 杨奎锋, 等. 2023. 中条山古元古代沉积岩容矿型铜钴矿床钴来源及富集过程[J]. *岩石学报*, 39(4): 1019–1029.
- 孙大中, 李惠民, 林源贤, 等. 1991. 中条山前寒武纪年代学、年代构造格架和年代地壳结构模式的研究[J]. *地质学报*, (3): 216–231.
- 孙大中, 胡维兴. 1993. 中条山前寒武纪年代构造格架和年代地壳结构[M]. 北京: 地质出版社: 1–168.
- 王雪, 黄小龙, 马金龙, 等. 2015. 华北克拉通中部造山带南段早前寒武纪变质杂岩的 Hf–Nd 同位素特征及其地壳演化意义[J]. *大地构造与成矿学*, 39(6): 1108–1118.
- 肖玲玲, 刘福来. 2015. 华北克拉通中部造山带早前寒武纪变质演化历史评述[J]. *岩石学报*, 31(10): 3012–3044.
- 杨崇辉, 杜利林, 任留东, 等. 2015. 中条山铜矿峪变质火山岩的时代、构造背景及对成矿的制约[J]. *地球学报*, 36(5): 613–633.
- 杨崇辉, 杜利林, 宋会侠, 等. 2018. 华北克拉通古元古代地层划分与对比[J]. *岩石学报*, 34(4): 1019–1057, 1229–1232.
- 杨崇辉, 杜利林, 宋会侠, 等. 2020. 中条山地区涑水杂岩新太古代烟庄正长花岗岩年龄及成因: 对华北克拉通地壳演化的制约[J]. *地球科学*, 45(9): 18.
- 翟明国, 卞爱国, 赵太平. 2000. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末—中元古代裂解[J]. *中国科学 (D 辑)*, 43: 219–232.

- 翟明国. 2004. 华北克拉通 2.1~1.7Ga 地质事件群的分解和构造意义探讨[J]. 岩石学报, 6: 42-53.
- 翟明国, 彭澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件[J]. 岩石学报, 11: 2665-2682.
- 翟明国. 2009. 华北克拉通两类早前寒武纪麻粒岩 (HT-HP 和 HT-UHT) 及其相关问题[J]. 岩石学报, 25(8): 1753-1771.
- 翟明国. 2011. 克拉通化与华北陆块的形成[J]. 中国科学:地球科学, 41(8): 10.
- 翟明国. 2012. 华北克拉通的形成以及早期板块构造[J]. 地质学报, 86(9): 1335-1349.
- 张晗. 2012. 山西中条山北段古元古代铜矿成矿作用[D]. 吉林大学博士学位论文: 1-168.
- 张瑞英, 张成立, 第五春荣, 等. 2012. 中条山前寒武纪花岗岩地球化学、年代学及其地质意义[J]. 岩石学报, 28: 3559-3573.
- 张瑞英, 张成立, 孙勇. 2013. 华北克拉通~2.5Ga 地壳再造事件: 来自中条山 TTG 质片麻岩的证据[J]. 岩石学报, 29: 2265-2280.
- 张瑞英, 孙勇. 2017. 华北克拉通南部早前寒武纪基底形成与演化[J]. 岩石学报, 33(10): 3027-3041.
- 赵国春. 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论[J]. 岩石学报, 25(8): 1772-1792.
- 赵凤清. 2006. 山西中条山地区古元古代地壳演化的年代学和地球化学制约[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文: 1-171.
- 赵太平, 邓小芹, 胡国辉, 等. 2015. 华北克拉通古/中元古代界线和相关地质问题讨论[J]. 岩石学报, 31(6): 1495-1508.
- 《中条山铜矿地质》编写组. 1978. 中条山铜矿地质[M]. 北京: 地质出版社: 25-88.
- 朱日祥, 郑天愉. 2009. 华北克拉通破坏机制与古元古代板块构造体系[J]. 科学通报, 54(14): 1950-1961.