

· 专题研究 ·

中国东部新太古代末期构造演化

——来自古老陆核构造恢复的启示

田忠华, 王伟, 刘平华

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 太古宙陆核的完整性对前寒武纪构造演化研究具有重要意义。华北克拉通东部陆块内太古宙陆核构造上受郯庐断裂影响较大,包括前期断裂带南侧 NNE 向左行走滑和后期断裂带北侧 NE 向左行走滑。本文还原了郯庐断裂发育之前华北克拉通东部陆块太古宙陆核的原始格局。构造恢复后古老地体及地体内岩石片麻理均呈 NNW 走向。通过对弓长岭地区 BIF 铁矿进行深入的构造解析工作,发现含矿太古宙表壳岩发育大量暗示水平运动的逆冲推覆构造。结合其年代学特征,本文进一步揭示新太古代末期一定规模的侧向挤压构造(水平运动)可能已经在华北克拉通内出现。

关键词: 太古宙构造演化; 弓长岭铁矿; 水平运动; 太古宙陆核; 构造恢复; 郯庐断裂

中图分类号: P542; P534.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)04-0681-14

Late Neoproterozoic tectonic evolution in eastern China: Enlightenment from the ancient continental core restoration

TIAN Zhong-hua, WANG Wei and LIU Ping-hua

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Unified Archean continental core is of great significance to the study of the tectonic evolution of Precambrian continental crust. The Archean continental core in the eastern block of the North China Craton is greatly affected by the Tan-Lu fault, including the early NNE-trend sinistral strike-slip movement in the southern segment of the Tan-Lu fault and the later NE-trend sinistral strike-slip movement in the southern segment of the Tan-Lu fault. This study restores the original pattern of the Archean continental crust in the eastern block of the North China Craton before the development of the Tan-Lu fault. The structural recovered ancient terrane and the gneissic foliations of the rocks all show the NNW-trending feature. Based on our structural analysis of the Gongchangling BIF area, a large number of thrust structures suggestive of a horizontal movement were developed in the ore-bearing Archean supercrustal rocks. Combined with geochronological age-dating of this Archean structure in the Gongchangling BIF, this paper further reveals that lateral compression structures (horizontal movement) may have occurred in the North China Craton at the end of the Neoproterozoic.

Key words: Archean tectonic evolution; Gongchangling BIF; horizontal movement; Archean continental core; structural restoration; Tan-Lu fault

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41890833, 92062214, 42172222); Project of China

收稿日期: 2021-12-10; 接受日期: 2022-04-08; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(41890833, 92062214, 42172222); 中国地质调查局项目(DD22021649); 中国地质科学院基本业务费项目(J2030)

作者简介: 田忠华(1984-), 副研究员, 主要从事构造解析、前寒武纪变质变形研究, E-mail: tianzhonghua@cags.ac.cn。

Geological Survey (DD22021649); Basic Scientific Research Foundations of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (J2030)

华北克拉通是现今世界上最古老的克拉通之一,对其进行深入的研究能够为前寒武纪生命演化、陆壳生长、板块构造启动等众多科学问题带来新的启示。近年来,通过对华北克拉通多方面深入的研究,学者们取得了丰硕的成果,对华北克拉通早期陆壳演化也有了较为完整的认识(Wan *et al.*, 2012a, 2012b)。Zhai 等(2021)对华北克拉通新太古代晚期岩浆和变质作用进行了归纳总结,认为太古代晚期所有古老基底岩系都经历了普遍的熔融和混合岩化作用,含有 BIF 的表壳岩主要分布在绿岩

带中;约 25 亿年角闪岩相到麻粒岩相变质作用普遍存在于>25 亿年的岩石单元中;约 25 亿年的基性岩墙、花岗质岩脉和正长岩-超基性岩墙在华北克拉通古老岩系中普遍分布,部分遭受强烈变形。

华北克拉通的早前寒武纪基底由多套不同类型、不同时代的变质岩系(3.8~1.8 Ga)组成(Zhai *et al.*, 2011; Zhao *et al.*, 2012)(图 1a)。其中太古宙基底普遍发生高级变质,跟其他克拉通对比,华北克拉通经历了相对较为复杂的后期构造过程,对其古老陆核构造格局的重建有助于理解克拉通记录

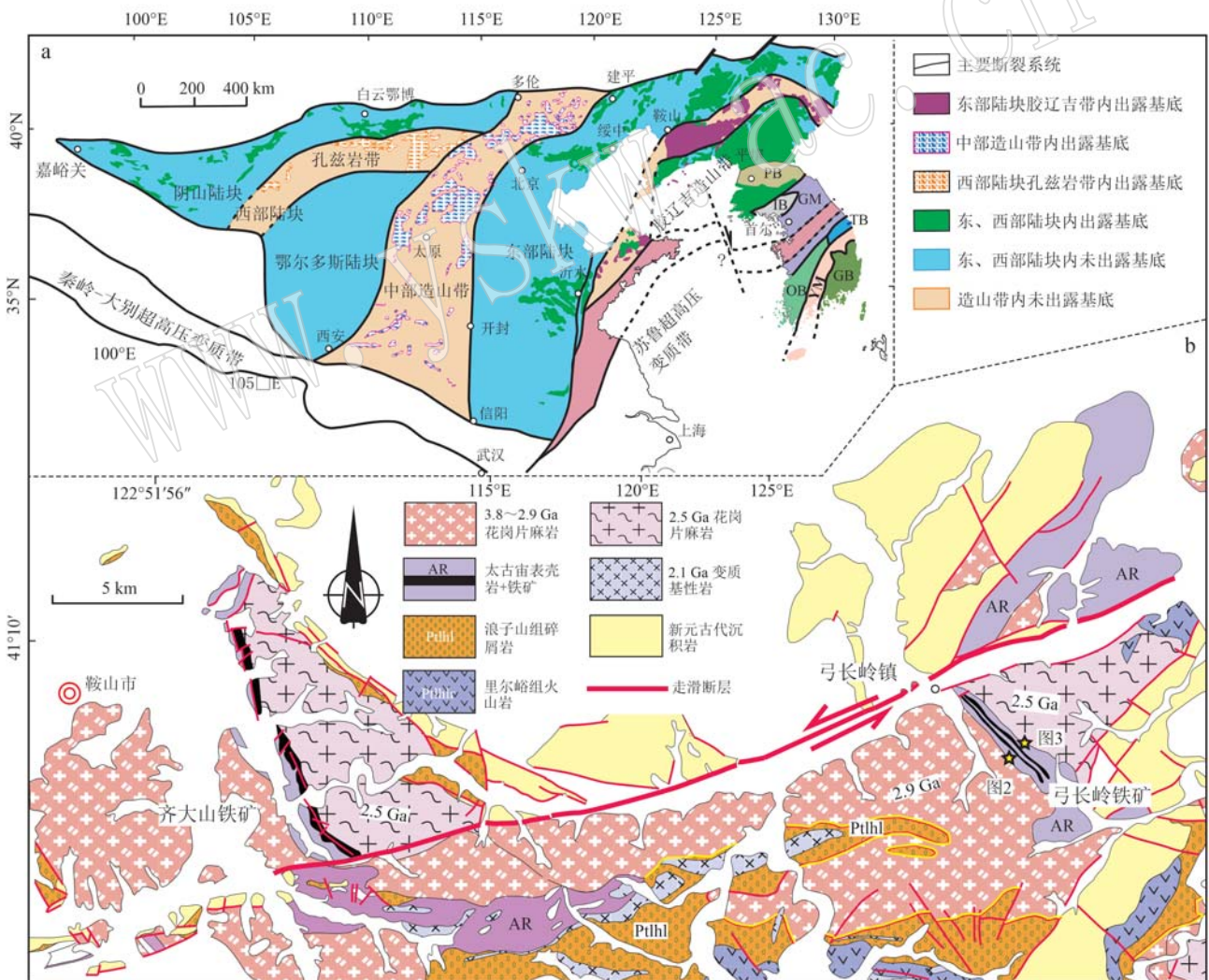


图 1 华北克拉通大地构造图[a, 据 Zhao 等(2012)]和鞍山弓长岭地区地质简图[b, 修改自 Tian 等(2021)]

Fig. 1 Tectonic map of the North China Craton (a, Zhao *et al.*, 2012) and simplified geological map of the Gongchangling area in Anshan (b, modified from Tian *et al.*, 2021)

的构造过程 (Zhai *et al.*, 2011; Peng *et al.*, 2015)。值得注意的是,华北克拉通在哥伦比亚超大陆聚合以后 (Zhao *et al.*, 2012),经历了严重的构造破坏过程,尤其是华北克拉通东部地区,受中生代三叠纪华南-华北陆陆碰撞及燕山期构造事件改造极为强烈 (Zhu *et al.*, 2017)。

侏罗纪-白垩纪古太平洋板块的俯冲作用导致华北克拉通东部陆块发生大规模岩石圈拆沉,较大程度上影响了华北克拉通的构造格局,对东部陆块内太古宙各岩石单元的分布特征产生了深远的影响 (Zhu *et al.*, 2017)。郯庐断裂多阶段的构造活动,使东部陆块内大量太古宙岩石-构造单元发生较大规模的位移 (Zhu *et al.*, 2005)。例如,华北克拉通内太古宙铁矿主要以鞍山型 BIF 铁矿 (Algoma 型铁矿) 为主, BIF 铁矿为后期的变形研究提供了较好的标志层。齐大山铁矿和弓长岭铁矿具有相同的矿床地质学特征 (Han *et al.*, 2014), 它们被汤河-寒岭左行走滑断层错开 (图 1b, Tian and Nutman, 2022)。深入剖析这些太古宙铁矿的分布和构造特征,能够为太古宙陆核的破坏和太古宙陆壳的演化提供新的启示。本研究主要立足于华北克拉通东部陆块,对弓长岭铁矿内的太古宙表壳岩进行了初步的构造工作,尝试解析太古宙少量残留的构造特征,并对比鞍山地区与冀东地区的 BIF 铁矿特征,以恢复中生代郯庐断裂发育之前东部陆块内太古宙陆核的原始面貌,进一步结合年代学工作探讨恢复太古宙各岩石单元原始面貌之后太古宙陆核的增生方式,为太古宙陆核恢复提供新的依据。

1 地质背景

华北克拉通一般可以分为两陆 (东部陆块和西部陆块) 和三带 (西部孔兹岩带、中部造山带和东部胶-辽-吉造山带) (Zhao *et al.*, 2012) (图 1a)。华北克拉通东部陆块拼合于早元古代,由西北侧龙岗地块和东南侧狼林陆块于 19.5 亿年相互作用而成,其标志为两陆块间胶-辽-吉造山带的形成 (Li *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2012; 田忠华等, 2020)。胶-辽-吉造山带是一条记录了多期岩浆-构造热事件、变质-变形作用的复合造山带,带内部发育有与重大岩浆-构造热事件存在密切成因关系的多种金属 (金、铁、铜等) 和非金属 (菱镁矿、硼矿、石墨等) 矿床 (刘福来等, 2015)。

东部陆块内前寒武纪岩石主要为太古宙基底和元古宙变质沉积岩,其中太古宙岩石主要以新太古代 TTG 和花岗片麻岩为主,同时还含有一些始太古代至中太古代岩石。始太古代岩石出露较为零星,在鞍山和冀东地区有少量出露 (Liu *et al.*, 1992)。中太古代岩石则较多,以鞍山地区 2.9 Ga 花岗岩为主 (Song *et al.*, 1996; Wan *et al.*, 2012b; Dong *et al.*, 2017) (图 1b)。Wan 等 (2012a) 对东部陆块内发育的各类太古宙岩石进行了系统的研究,列举了这些岩石出露的 3 个关键区域: ① 鞍山地区; ② 冀东绥中地区,碎屑锆石中含有少量 38 亿年年龄信息,其余主要为 25 亿年 TTG 及花岗岩; ③ 鲁西泰安地区,发育较多老于 26 亿年的变质岩系 (以 29~26 亿年为主) 以及大量 25 亿年花岗岩。值得一提的是,近年来,新一轮地质调查项目 (2019~2021 年) 在胶北地体中又发现大量的 29~26 亿年花岗质片麻岩。

2 太古宙表壳岩 (含 BIF 标志层) 构造及年代学特征

2.1 野外构造特征

鞍山-弓长岭地区 BIF 铁矿主要赋存于太古宙绿岩带内,这些表壳岩主要包括变玄武岩、斜长角闪片麻岩和片岩 (变质泥质岩)。弓长岭铁矿内表壳岩为鞍山岩群,与其共生的深成岩主体为中太古代至新太古代花岗岩 (2.9~2.5 Ga) (Wan *et al.*, 2012b; Dong *et al.*, 2017)。矿区内岩石组成为变质玄武岩、变质泥质岩和磁铁矿石岩。铁矿围岩为变质玄武岩,其中 BIF 铁矿主要赋存于石英岩中,以磁铁矿石岩形式存在。变质泥质岩中含有石榴子石 (图 2a)、十字石等矿物,变质程度能达到中温中压相系。

本研究对弓长岭矿区东、西两侧两个露头进行了深入的构造解析工作 (具体位置见图 1b)。矿区西侧一处露头可见变质玄武岩中发育较为典型的双冲构造 (duplex),以脆性断层为主,局部见少量韧性断层面,变形为浅表构造层次,顶板断层和底板断层都呈中等角度倾向 60° (ENE),断层内马石高角度倾向 ENE,指示向 WSW 方向的构造运动 (图 2b)。矿区东侧一处较为复杂的露头 (图 3a) 可见大量中等角度到低角度倾向西的顶-底板断层,断层内马石发育,组成较好的双冲构造 (图 3b、3c)。由此可初步判断,弓长岭矿区内东、西两侧变质玄武岩及含矿磁

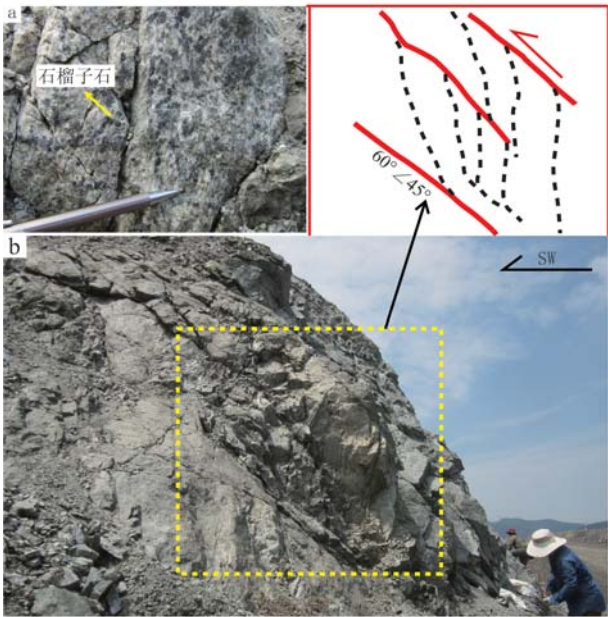


图2 弓长岭BIF铁矿内变质泥质岩(a)和变质玄武岩(b)的野外照片

Fig. 2 Field photos of garnet-bearing meta-sediment rock (a) and meta-basalt (b) in the Gongchangling BIF

铁石英岩内所发育的构造样式基本相同,运动学方向相反,东侧向ENE方向逆冲,西侧向WSW方向逆冲。

弓长岭矿区东侧露头中,变质玄武岩中可见同构造花岗岩脉侵入。花岗岩脉顺逆冲推覆构造变质底板面侵入,发生变形部分岩脉发育双冲构造(图3d),显示此岩脉卷入到逆冲推覆构造中。局部也可见未变形同类型岩脉侵入到变质玄武岩中(图4a),故其被定义为同构造岩脉。

2.2 同构造岩脉年代学特征

采集同构造岩脉样品17TZH21进行了年代学测定。在河北省廊坊市地智科技有限公司完成锆石分选,后将锆石送至南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成拍摄CL图像,实验设备为TESCAN场发射扫描电镜(型号:MIRA 3LMH)搭配CL探头。实验过程中加速电压7 kV,吸收电流1.2 nA,每一次扫描的间隔为80 s。锆石U-Pb年龄在北京快科赛默科技有限公司的串联四级杆电感耦合等离子体质谱(Agilent ICP-MS/MS 8900)测定。使用NIST SRM 612

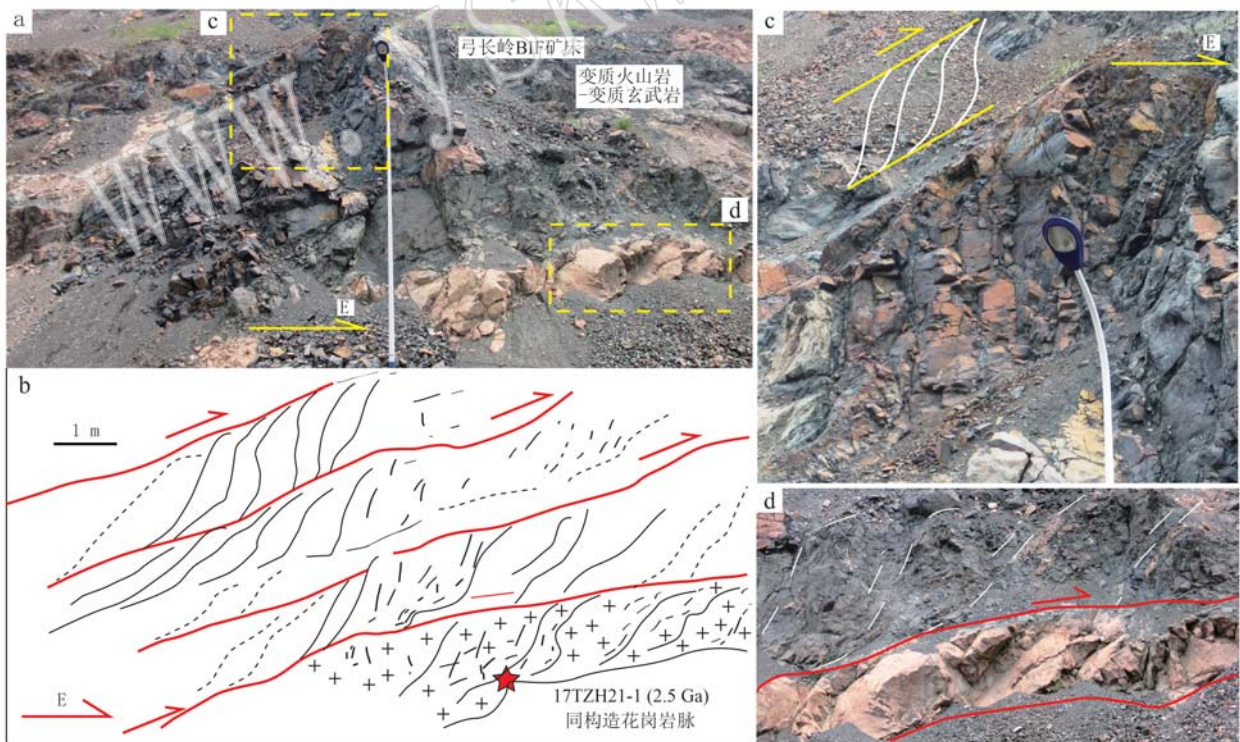


图3 鞍山地区弓长岭铁矿内变质沉积岩变形特征

Fig. 3 Deformation characteristics of the meta-sediments in the Gongchangling BIF in Anshan area

a—露头整体特征; b—露头素描; c—局部显示双冲构造发育; d—同构造岩脉侵入到变质玄武岩中
a—overall feature of the outcrop; b—sketch of the outcrop; c—developing duplexes are shown in a local area; d—syn-tectonic granitic vein intruded into the meta-basalts

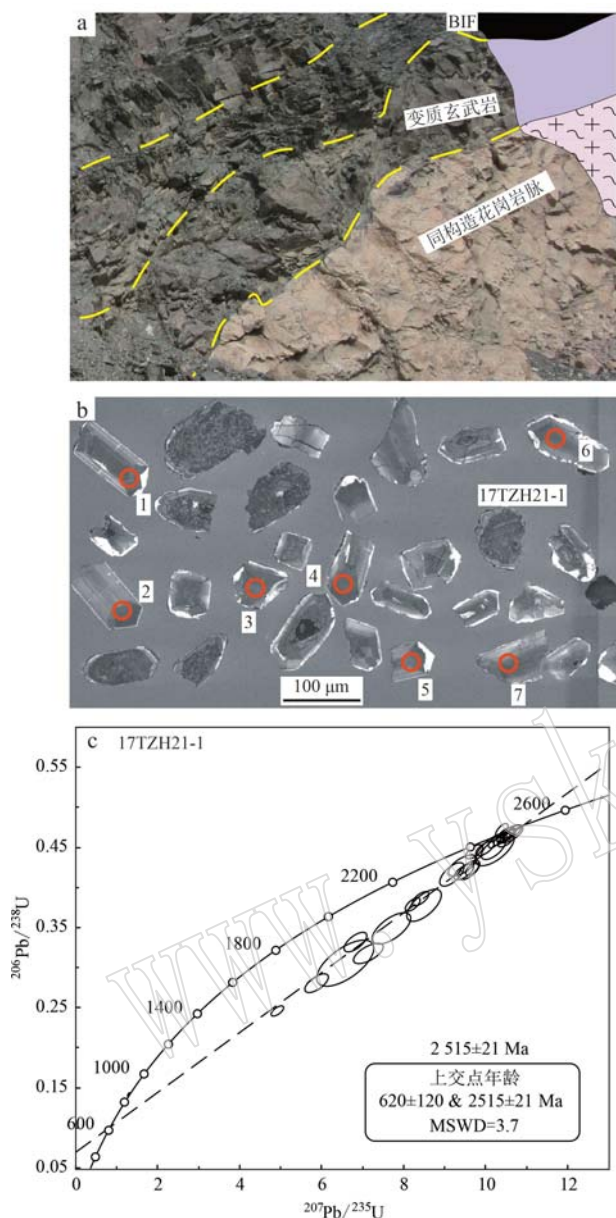


图4 鞍山地区弓长岭铁矿内同构造岩脉野外特征(a)、同构造岩脉样品(17TZH21-1)锆石CL特征(b)及测年结果(c)

Fig. 4 Field characteristics of the syn-tectonic vein (a), zircon CL images in syn-tectonic vien(17TZH21-1) (b) and age result of the sample(17TZH21-1) (c)

优化了LA-ICP-MS中载气和补偿气体的比值。待激光烧蚀系统和ICP-MS准备好后,测试样品17TZH21-1。在激光剥蚀过程中,载气为He,补偿气体为N₂,激光能量密度为3.5 J/cm²,频率为5 Hz,剥蚀点直径25 μm。两种气体通过T型接头混合,然后进入ICP。Iolite用于处理离线数据。软件具有优化的分馏图像模型,并且可以激光记录日志文件。

采用ComPbCorr#3.18程序对普通Pb进行校正。

测年结果显示,锆石较为自形,部分具有较好的震荡环带,为岩浆锆石(图4a、4b, Corfu *et al.*, 2003),测年结果表明其形成时代为2 515±21 Ma(表1、图4c)。

此外,古元古代构造线性方向为EW向(Li *et al.*, 2005),与太古宙NNW-SSE向不一致;弓长岭矿区及附近太古宙基底受三叠纪构造影响较小;研究区白垩纪构造主要为伸展拆离构造(Tian *et al.*, 2020),因此,可初步判定该岩脉形成时代能够限定矿区ENE方向和WSW方向的逆冲作用。综合以上构造特征和测年结果可知,区域内向东西两侧发育的构造运动,形成于新太古代末期。

3 郯庐断裂基本特征

受中生代构造影响,尤其是燕山运动,东部陆块太古宙基底破坏较为严重(Zhu *et al.*, 2017)。燕山期构造包括早期古太平洋板块的向西斜向俯冲及后期板块后撤引起的伸展作用(Zhu *et al.*, 2009; 董树文等, 2019; 田忠华, 2021)。对东部陆块影响较为深远的断裂构造主要为郯庐断裂及其北侧分支断裂(图5)。Tian和Nutman(2022)认为郯庐断裂的北段为东向扇形扩展性走滑断裂带,其中汤河-寒岭走滑断裂对鞍山-本溪地区太古宙岩石影响较大。因此,要恢复太古宙各类地体或岩石单元的原始状态,需要对整个郯庐断裂的几何学、运动学特征进行深入的构造解析工作。

郯庐断裂整体走向NNE-SSW,是一条地壳尺度的深断裂带(深度大于10 km),南北长约3 000 km。郯庐断裂由南向北切穿扬子板块、大别-苏鲁造山带和华北克拉通,甚至延伸至中亚造山带(Zhu *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2016)(图5)。郯庐断裂南段较为复杂,切穿的地体和山系较多,Zhao等(2016)对郯庐断裂南部各断裂系统进行了深入的总结工作。部分学者认为郯庐断裂南部(现今渤海湾位置以南)的左行走滑量达到550 km左右(Zhu *et al.*, 2009)。向北经过渤海湾(现今地理位置)后,郯庐断裂的表现形式较为复杂(Zhu *et al.*, 2015),分裂成两条断裂带:西部宜兰-伊通断裂和东部密山-敦化断裂(走向变为NE-SW)(Zhang *et al.*, 2003; Zhu *et al.*, 2015)。除这两条断裂带以外,大量左行走滑断裂带与NE-SW向密山-敦化断裂带平行,例如汤河-寒岭

表 1 弓长岭 BIF 铁矿内同构造花岗岩脉 17TZH21-1 样品年代学特征
 Table 1 Geochronological feature of the syntectonic vein sample (17TZH21-1) in Gongchangling BIF

序号	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			同位素比值			同位素年龄/Ma						
	Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$		
#01	1 537.0	1 922.0	598.0	3.2	7.72	0.310 0	0.35	0.013 0	0.159 0	0.001 0	2 177.0	36.0	1 918.0	60.0	2 443.0	11.0
#02	1 638.0	1 588.0	178.1	8.9	10.58	0.110 0	0.47	0.005 3	0.164 1	0.000 9	2 485.0	9.6	2 466.0	23.0	2 497.8	9.2
#03	1 073.0	1 190.0	542.4	2.2	8.23	0.120 0	0.38	0.005 6	0.156 9	0.000 9	2 256.0	13.0	2 070.0	26.0	2 422.9	9.2
#04	2 099.0	2 196.0	150.4	14.6	10.59	0.094 0	0.47	0.004 3	0.164 6	0.001 0	2 486.7	8.3	2 467.0	19.0	2 501.0	10.0
#05	1 687.0	1 678.0	168.2	10.0	10.45	0.110 0	0.46	0.004 9	0.163 6	0.001 0	2 475.6	9.6	2 453.0	21.0	2 491.0	10.0
#06	781.0	918.0	870.0	1.1	6.58	0.460 0	0.31	0.019 0	0.152 9	0.001 5	1 987.0	67.0	1 694.0	96.0	2 377.0	18.0
#07	752.0	704.0	217.0	3.2	9.99	0.140 0	0.45	0.005 8	0.160 8	0.001 1	2 432.0	13.0	2 389.0	26.0	2 461.0	12.0
#08	248.0	289.0	919.0	0.3	5.89	0.190 0	0.28	0.008 0	0.151 4	0.001 5	1 947.0	28.0	1 591.0	40.0	2 358.0	17.0
#09	715.0	675.0	512.0	1.3	9.48	0.160 0	0.42	0.006 6	0.163 2	0.000 8	2 381.0	16.0	2 255.0	31.0	2 487.7	7.9
#10	69.4	194.0	232.5	0.8	1.30	0.018 0	0.14	0.001 7	0.066 7	0.000 7	846.6	8.0	853.0	95.0	824.0	21.0
#11	990.0	937.0	245.0	3.8	9.60	0.180 0	0.42	0.008 2	0.164 5	0.001 0	2 395.0	18.0	2 266.0	38.0	2 500.0	11.0
#12	1 456.0	1 381.0	251.8	5.5	10.49	0.130 0	0.47	0.005 9	0.162 4	0.000 9	2 479.0	11.0	2 466.0	25.0	2 479.7	9.6
#13	1 154.0	938.0	465.0	2.0	9.74	0.140 0	0.44	0.005 8	0.158 3	0.000 9	2 410.0	13.0	2 369.0	26.0	2 436.2	9.4
#14	2 440.0	753.0	1 710.0	0.4	10.20	0.880 0	0.32	0.006 8	0.233 0	0.021 0	2 411.0	76.0	1 799.0	34.0	2 970.0	140.0
#15	455.0	570.0	1 219.0	0.5	6.83	0.180 0	0.33	0.008 0	0.148 6	0.000 7	2 080.0	25.0	1 844.0	39.0	2 329.0	8.5
#16	1 026.0	909.0	788.0	1.2	8.51	0.280 0	0.38	0.013 0	0.164 1	0.003 0	2 283.0	30.0	2 063.0	61.0	2 495.0	31.0
#17	2 850.0	2 664.0	572.0	4.7	10.34	0.092 0	0.46	0.004 4	0.162 8	0.000 8	2 465.4	8.2	2 437.0	19.0	2 483.8	7.9
#18	2 791.0	2 560.0	41.4	61.8	10.61	0.210 0	0.47	0.007 5	0.164 3	0.002 0	2 487.0	18.0	2 466.0	33.0	2 501.0	20.0
#19	2 699.0	2 203.0	286.1	7.7	9.68	0.110 0	0.42	0.005 2	0.165 6	0.001 0	2 403.0	11.0	2 274.0	24.0	2 513.2	9.7
#20	2 920.0	2 637.0	1 091.0	2.4	9.19	0.200 0	0.42	0.009 7	0.160 8	0.002 2	2 355.0	20.0	2 242.0	44.0	2 461.0	23.0
#21	1 572.0	1 284.0	202.0	6.4	10.20	0.200 0	0.45	0.008 9	0.164 2	0.001 7	2 453.0	17.0	2 386.0	40.0	2 497.0	18.0
#22	1 260.0	1 002.0	350.5	2.9	10.41	0.100 0	0.47	0.005 6	0.160 5	0.001 1	2 470.5	9.1	2 487.0	25.0	2 459.0	12.0
#23	1 225.0	1 012.0	701.0	1.4	10.22	0.099 0	0.46	0.004 6	0.161 9	0.000 8	2 454.5	9.0	2 426.0	20.0	2 474.8	7.8
#24	601.0	743.0	1 731.0	0.4	4.92	0.100 0	0.25	0.004 2	0.145 6	0.001 3	1 804.0	17.0	1 419.0	21.0	2 291.0	16.0
#25	1 793.0	1 598.0	1 265.0	1.3	8.42	0.130 0	0.39	0.005 7	0.157 6	0.001 1	2 276.0	13.0	2 105.0	26.0	2 429.0	12.0
#26	1 992.0	1 613.0	855.0	1.9	9.44	0.230 0	0.43	0.008 9	0.159 9	0.001 8	2 381.0	23.0	2 294.0	40.0	2 451.0	19.0
#27	2 511.0	2 017.0	215.8	9.3	10.51	0.130 0	0.46	0.005 6	0.165 6	0.001 1	2 480.0	12.0	2 439.0	24.0	2 513.0	11.0
#28	1 513.0	1 256.0	768.0	1.6	10.23	0.320 0	0.45	0.014 0	0.165 8	0.001 9	2 458.0	27.0	2 383.0	63.0	2 518.0	21.0
#29	2 171.0	1 706.0	710.3	2.4	10.70	0.120 0	0.47	0.005 3	0.164 7	0.000 9	2 499.0	10.0	2 482.0	23.0	2 503.1	9.4
#30	1 594.0	1 227.0	956.0	1.3	7.14	0.240 0	0.32	0.008 4	0.162 5	0.002 1	2 121.0	27.0	1 776.0	40.0	2 482.0	22.0

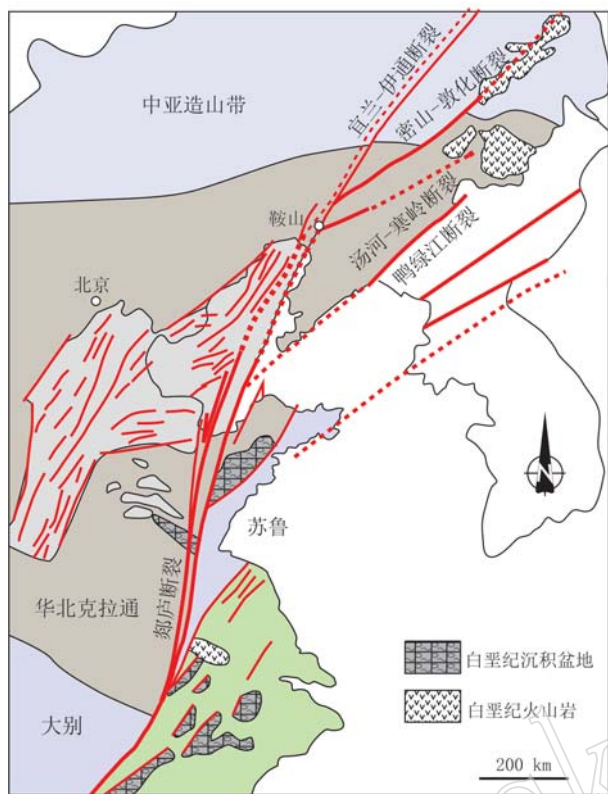


图5 郯庐断裂带构造特征 [(修改自 Zhang 等(2003)、Zhu 等(2015)]

Fig. 5 Structural features of the Tau-Lu fault zone (modified after Zhang *et al.*, 2003; Zhu *et al.*, 2015)

断裂带 (张国仁等, 2004; 姜岩等, 2016; Tian and Nutman, 2022)、鸭绿江断裂带等 (Zhang *et al.*, 2018)。这些断裂都为郯庐断裂的北向扩展性断裂 (Tian and Nutman, 2022)。

4 讨论

4.1 郯庐断裂的发育

对华北克拉通东部陆块各块体和岩石单元进行构造恢复之前,需要对郯庐断裂的发育历史进行简单讨论。郯庐断裂南起湖北,经过安徽庐江、山东郯城,到现今渤海湾位置,最后分支为宜兰-伊通断裂、密山-敦化断裂、汤河寒岭断裂和鸭绿江断裂 (图 5)。早期研究认为郯庐断裂带形成于华南板块和 华北克拉通的碰撞,时代为中三叠世 (Yin and Nie, 1993; Zhu *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2012)。三叠纪碰撞事件引起大规模 N-S 向缩短,这个过程伴随有 N-S 向左行走滑断裂 (郯庐断裂初始形成),最终导致大别和苏鲁造山带发生错位。需要指出的是,中三叠

世郯庐断裂并没有达到现今渤海湾位置 (Zhu *et al.*, 2009),部分学者认为直到晚侏罗世,郯庐断裂才扩展至现今渤海湾位置,引起各类块体和岩石单元发生大规模左行走滑 (王志才等, 2006; Zhu *et al.*, 2010)。Zhu 等 (2015) 认为渤海湾地区的郯庐断裂在白垩纪到新近纪受到一系列正断层的影响,以至于在断裂带附近形成大量的裂谷盆地。此外,大量地震活动显示郯庐断裂带在第四纪也较为活跃,并具有右行走滑特征 (Zhu *et al.*, 2015)。

据现今年代学报道,郯庐断裂南部发育得较早,进入渤海湾 (现今地理位置) 后的北段发育得较晚 (Zhu *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2017; Yu *et al.*, 2018; Shu *et al.*, 2020; Tian and Nutman, 2022)。此外,郯庐断裂南段走滑断层主要以 NNE-SSW 向左行走滑为主 (图 6a),过现今渤海湾位置后除 NNE-SSW 向左行走滑断层外,还发育大量 NE-SW 向左行走滑断层 (图 6b) (朱光等, 2016; Zhang *et al.*, 2018; Tian and Nutman, 2022)。因此,笔者认为东北地区 NE 向左行走滑断层的发育可能与西太平洋板块俯冲角度调整或运动学方向调整相关,应力场受到扰动后形成大量 NE 向断裂。新生代渤海湾的张裂与 NE-SW 向左行走滑存在一定的关系 (图 6c)。然而引起渤海湾张裂的动力学过程需要进一步研究, Huang 等 (2007) 通过对郯庐断裂东侧古地磁的综合研究,指出胶东、辽东以及朝鲜半岛等地区大量微陆块发生了差异性的旋转,东亚地区可能以日本海及其周边地区为旋转轴发生了扇形张裂作用,引起这一系列张裂作用的原因是软流圈地幔上涌。

综上,为更好恢复华北克拉通东部地区各块体的原始状态,本文简单反演了郯庐断裂的发育过程: ① 华南-华北碰撞末期 (晚三叠世), 郯庐断裂走滑作用开始, 侏罗纪由于受到古太平洋斜向俯冲作用的影响, 郯庐断裂开始发生大规模的左行走滑 (图 6d)。② 侏罗纪末至白垩纪初, 持续高角度斜向俯冲作用, 使古太平洋板块发生后撤, 郯庐断裂不断持续向北发育 (图 6e), 日本岛弧后区域初始张裂。③ 白垩纪至新生代某阶段 (需要深入研究工作), 板块在球面上运动时, 受太平洋板块俯冲角度调整或者岛弧岩浆作用的影响, 板块移动方向发生变化, 古应力场受到扰动, 白垩纪初大量 NE-SW 向走滑断裂发育于现今渤海湾位置北侧 (中国东北地区) (图 6f)。至渐新世, 日本弧后盆地及渤海湾全面拉开。④ 新生

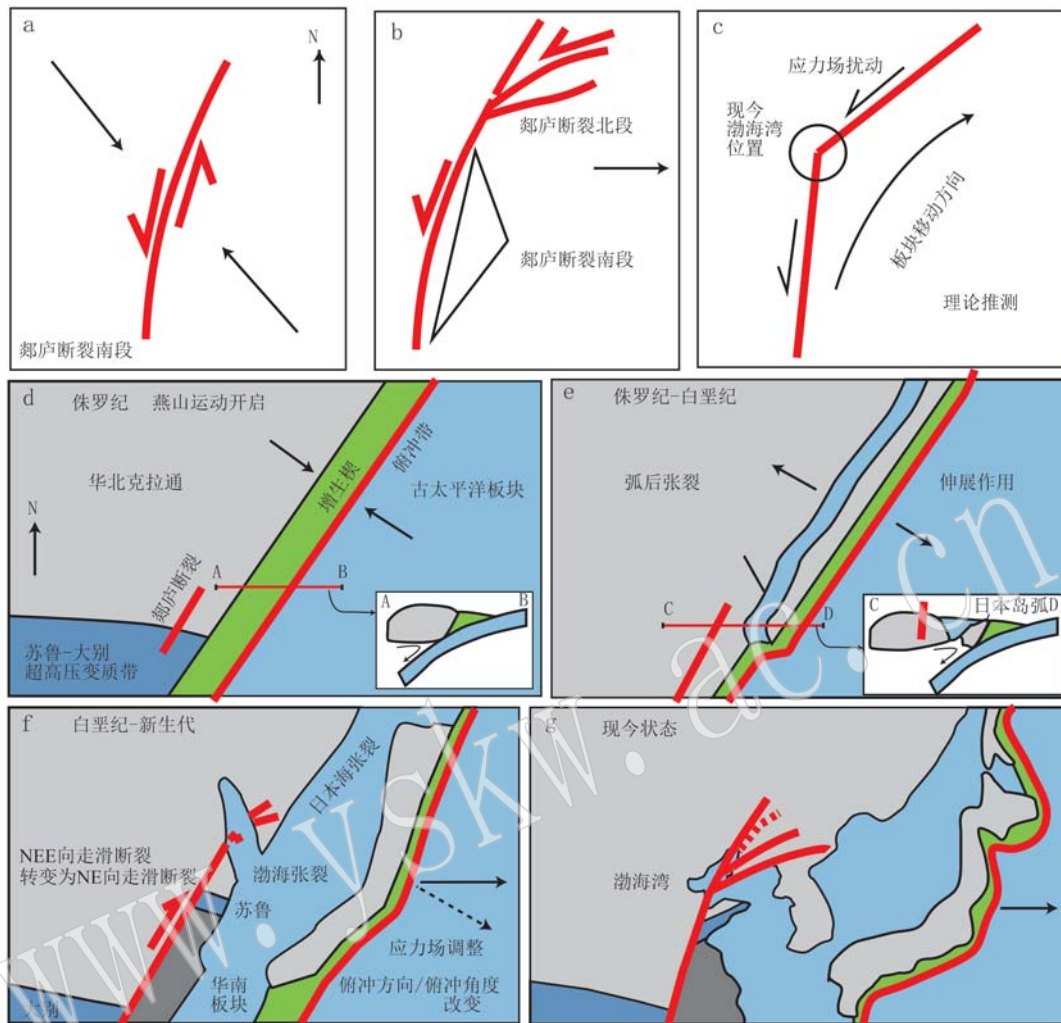


图6 郯庐断裂带发育过程(a~c)和中国东部地区不同阶段构造格局特征(d~g)

Fig. 6 Development of the Tan-Lu fault zone(a~c) and tectonic configuration in difference phases of the eastern China(d~g)

代至今,日本弧后盆地不断张裂,渤海湾持续打开至现今状态(图6g)。

4.2 华北克拉通东部地体构造恢复

前文对郯庐断裂的性质及其两阶段发育过程进行了初步的构造解析,为下一步构造恢复工作提供了重要依据。值得一提的是, Peng 等(2015)对东部陆块内各岩石单元也进行了构造恢复工作,主要考虑的是郯庐断裂 NNE 向左行走滑,基本实现陆块内各太古宙基底的对应关系(图7)。图7显示清源地区和鞍山地区始太古代-中太古代的岩石在构造恢复后对应鲁西地区新太古代的岩石。需要指出的是,郯庐断裂进入渤海湾后,其分支断裂系统比较发育,构造异常复杂,需要考虑 NE-SW 向走滑断层对渤海湾张裂的影响,以此为基础恢复前寒武纪地体

原始面貌可能更为合理;与鞍山地区能够对比的含有始太古代信息的岩石单元在冀东地区。因此,东部陆块的构造恢复工作值得进一步解析。

对于郯庐断裂的走滑量问题,前人已做过大量的研究工作,观点众多,大部分学者都支持郯庐断裂的走滑量在 400~500 km 左右(Zhao *et al.*, 2016),仅少部分学者认为郯庐断裂并没有发生明显的走滑或者仅仅其南段走滑了 200 km(Li, 1994)。本研究支持郯庐断裂的走滑量较大,在 400~500 km 左右,理由如下:两个标志性的超高压变质带,大别超高压变质带和苏鲁超高压变质带被郯庐断裂错开近 400 km;其分支断裂(汤河-寒岭断裂带)的走滑量达到 28~53 km(图8)(姜岩等, 2016; Tian and Nutman, 2022)。

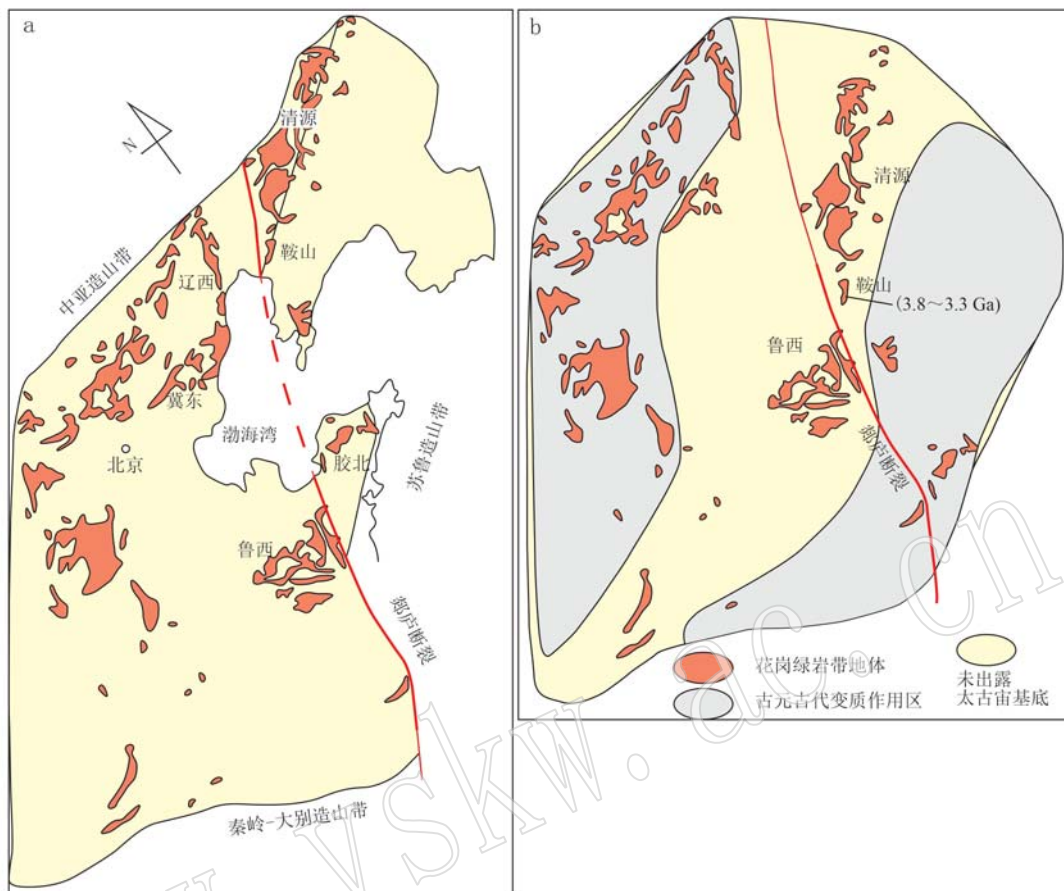


图 7 东部陆块前寒武纪岩石单元单一阶段构造恢复 [引自 Peng 等(2015)]

Fig. 7 Single stage structural restoration of Precambrian rock unit in eastern continental block (Peng *et al.*, 2015)

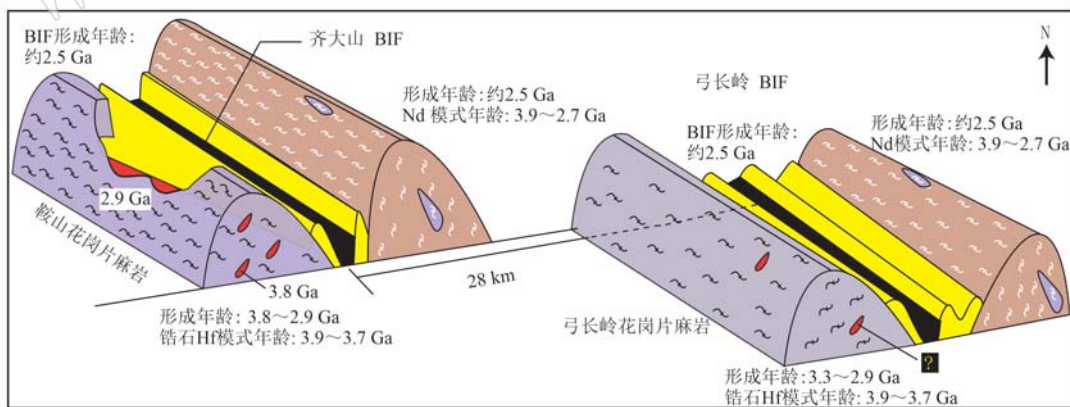


图 8 汤河-寒岭断裂带 28 km 走滑量示意图 [修改自 Tian 和 Nutman(2022)]

Fig. 8 Schematic map of the 28 km strike-slip displacement of the Tanghe-Hanling fault (modified after Tian and Nutman, 2022)

此外,郟庐断裂(长约 3 000 km)北段 NE-SW 向断裂带对冀东-东北地区前寒武纪基底具有深刻的影响(Tian and Nutman, 2022)。例如,对于密山-敦化断裂(长 1 000 km)来说,有学者通过系统总结佳

木斯地块、兴凯地块以及松嫩-张广才岭地块东缘的古生代-中生代各类火山岩的锆石 U-Pb 年代学资料,深入剖析了它们的空间分布规律,认为敦化-密山左行走滑断裂的断距至少有 400 km(王枫等,

2016)。此外,相对于敦化-密山断裂来说规模较小的汤河-寒岭断裂带(或寒岭-偏岭断裂带长 130 km),断距也达到 28~53 km(姜岩等, 2016; Tian and Nutman, 2022)。Zhang 等(2018)文中虽然没有对 NE-SW 向的鸭绿江断裂带(总长约 700 km)进行断距估算,但是根据其构造特征可知,该断裂的断距可能不会低于 200 km。

郯庐断裂具有以下两个特征: 郯庐断裂由南向北扩展发育,进入现今渤海湾位置后发育大量 NE-SW 向左行走滑断裂(Tian and Nutman, 2022)。据此,本研究提出东部陆块中新生代构造恢复二阶段方法: 先恢复北侧 NE-SW 向左行走滑构造,后恢复南侧 NNE-SSW 向左行走滑构造,具体过程如图 9: ① 东部陆块内老于 27 亿年的太古宙残片主要分布于鞍山地区、冀东绥中地区、鲁西泰安和胶北栖霞地区(图 9a),太古宙 BIF 铁矿标志层主要发育于鞍山地区和冀东地区。② 第 1 阶段,恢复郯庐断裂北断所发育 NE-SW 向走滑断层,以密山-敦化断裂带为主,沿着断裂带的方向将该断裂的东南盘向西南方向移动断距约 300 km(保守估计,王枫等 2016 文章中为 400 km)。鞍山地区约 38~29 亿年岩石单元移动至冀东绥中地区(含 38 亿年信息)之下。辽南地区 25 亿年狼林陆块基底能够与鲁西地区发育的大量 25 亿年花岗岩及 TTG 进行对比。鞍山地区所发育大量太古宙 BIF 能够与冀东地区的 BIF 进行对比(Han *et al.*, 2014)(图 9b)。③ 朝鲜端川-松林一带同样发育一条 NE-SW 向左行剪切带(端川-松林断裂带),将断裂带东南侧朝鲜南部和韩国向西南方向移动约 300 km(图 9c)。朝鲜南部和韩国内所发育的各类岩石能够与苏鲁超高压变质带以及华南各类岩石单元进行对比。此结果与 Oh (2006) 的对比结果一致。④ 第 2 阶段,恢复郯庐断裂南段(NNE-SSW)构造特征,将郯庐断裂带东侧、端川-松林断裂带东南侧各类岩石单元,整体向南偏西方向移动约 500 km,得到如图 9d 几何学形态特征。移动主要依据为苏鲁超高压变质带与秦岭-大别超高压变质带能够进行对比(Zhao *et al.*, 2016)。

二阶段走滑断层恢复后,华北克拉通东部陆块呈现的构造格局如图 9e 所示: 冀东绥中地区的太古宙岩石及 BIF 铁矿(含 38 亿年信息)可以与鞍山地区进行对比,鲁西地区 29~27 亿年 TTG 及花岗岩能够与胶北栖霞地区(胶北地体)的 29~27 亿年 TTG 及花岗岩进行对比。这些始太古代-中太古代岩石

的整体分布具有 NNW-SSE 向特征(图 9f),与我们在鞍山、冀东、鲁西和栖霞地区所测量到的花岗岩中片麻理方向基本一致(Tian and Nutman, 2022)。

4.3 新太古代末期构造演化

太古宙陆核恢复后,太古宙岩石单元分布及片麻理的几何学特征均呈现 NNW-SSE 向特征,暗示太古宙时期构造线方向可能以 N-S 向为主(E-W 方向相互作用)。因此,本文简单讨论新太古代末期的大地构造演化特征。太古宙(3.8~2.5 Ga)是地质历史上一段非常漫长的时期,关于太古宙时期的构造体制一直是早前寒武纪研究的热点问题之一,同时也是争论的焦点,概括起来主要有垂向构造体制和横向构造体制两种观点。第 1 种观点认为太古宙的构造样式表现为“dome and keel structure”(穹窿-龙骨构造)(Marshak *et al.*, 1992; Zhao *et al.*, 2021),即片麻岩穹窿之间夹杂着发生重力下沉作用的绿岩带,其动力学机制可能来自于垂向作用的地幔柱,这与太古宙之后由板块俯冲-碰撞形成的线性造山带有明显差异。第 2 种观点认为太古宙构造与板块俯冲导致的碰撞造山有关。如 Kusky (2007, 2016) 提出华北陆块在 3.5~2.7 Ga 期间就通过微陆块和岛弧的碰撞形成较大的东部和西部陆块,二者之间的洋盆俯冲导致两个陆块在 2.5 Ga 发生碰撞。刘树文等(2018)通过对冀东-辽西地区太古宙基底岩石进行岩石地球化学研究与大地构造解析,认为该区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构造体制。

本研究通过初步的构造地质学和年代学工作,认为与现今板块构造体制相像的构造作用,在新太古代末可能已经出现,主要依据来源于以下几点认识: 首先,华北克拉通内太古宙陆核从 38 亿年开始出现不同阶段生长,经历重熔形成一个或多个走向为 NNW 向的太古宙地体。需要指出的是,不同地区(鞍山、冀东、鲁西、胶北、赞皇等)太古宙 TTG 和花岗岩的形成时代不一致,地壳重熔时间也不一致,残留古老地壳物质的量和时代也不相同。例如东部陆块内保留最古老陆核信息仅在鞍山和冀东地区。此外,鞍山地区有 33~29 亿年陆壳信息,鲁西地区有 29~27 亿年陆壳信息。25 亿年陆壳重熔作用则在东部陆块内较为普遍。古老太古宙陆核的形成成为太古宙表壳岩的沉积和 BIF 的形成提供了必要的条件。研究区内,部分学者试图通过 BIF 重力下沉模式来解释太古宙末期的构造体制,然而在这里需要强调的

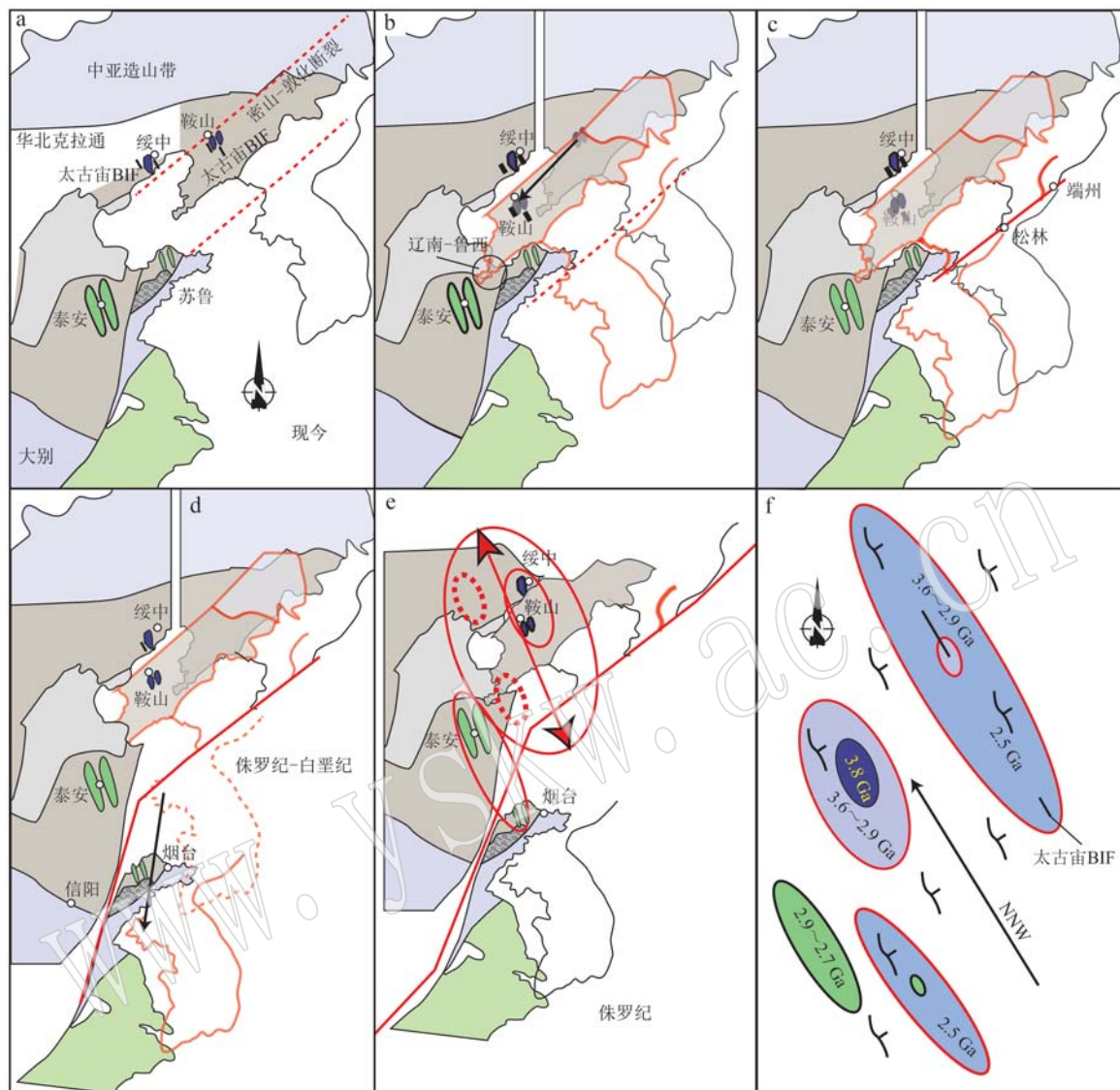


图 9 东部陆块前寒武纪地体及岩石单元多阶段构造恢复 [修改自 Tian 和 Nutman(2022)]

Fig. 9 Multiple stages structural restoration of the Precambrian terranes and rock units of the eastern continental block (modified after Tian and Nutman, 2022)

a—原始状态; b—一阶段恢复 NE-SW 向密山-敦化断裂带; c—一阶段恢复 NE-SW 向端州-松林断裂带; d—二阶段恢复郯庐断裂带南段; e—恢复后东部陆块个地体的分布特征; f—地体中片麻走向呈 NNW 方向
 a—original state; b—restoration of the Mishan-Dunhua fault zone (strikes NE-SW) in the first stage; c—restoration of the Duanchuan-Songlin fault zone (strikes NE-SW) in the first stage; d—restoration of the Tan-Lu fault zone in its southern section in the second stage; e—rocks and terrane distribution of the eastern block after structural restoration; f—gneissic foliations in Archean terrane strike NNW-direction

是与 BIF 共生的大量表壳岩 (如含石榴子石的变泥质岩,图 2a) 在此时需要一个较为稳定的海相沉积环境。太古宙表壳岩中碎屑-泥质岩和含 BIF 石英岩原岩开始沉积,太古宙基底局部张裂形成洋盆,大量 BIF 在有水存在的情况下发生沉积。其中鞍山和冀东地区太古宙 BIF 铁矿较为发育 (Han *et al.*, 2014),鲁西地区 BIF 铁矿较为零星 (图 10a)。其次,太古宙构造变形阶段 (约 2.5 Ga),弓长岭矿区中

表壳岩发生变形,矿区西侧表壳岩向 WSW 方向运动,矿区东侧向 ENE 方向运动 (图 1b、图 10b),同期形成大量同构造花岗岩脉。大量中等角度到低角度逆冲推覆构造的形成成为太古宙水平运动提供了初步的证据,暗示中国东部新太古代末期侧向挤压构造的产生 (图 10b)。本研究仅提供了弓长岭太古宙 BIF 矿区的研究个案,这些构造是否暗示早期板块构造的启动,需要更多的工作来证明。

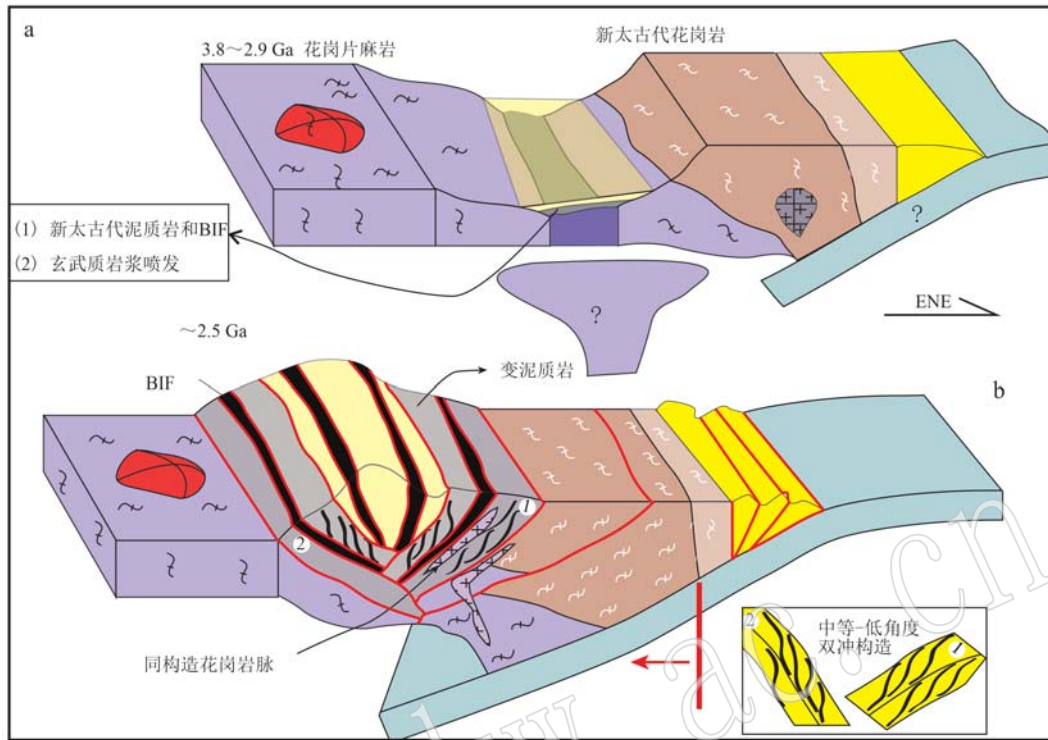


图 10 中国东部新太古代末期构造演化模型

Fig. 10 Tectonic evolution model of late Neoproterozoic, eastern China

a—地幔柱或俯冲引起的大陆裂谷,大量太古宙岩石如 TTG 及花岗岩形成,同时伴随有 BIF 沉积; b—新太古代末期,大规模水平构造出现,暗示早期板块构造的启动

a—continental rift produced by mantle plume or subduction, huge Archean rocks such as TTG and granite formed in this stage, as well as BIF deposition; b—Late Neoproterozoic, huge horizontal structural occurred, which indicates the initiation of early plate tectonic

5 结论

(1) 华北克拉通东部陆块整体受郯庐断裂南段 NNE-SSW 向和北段 NE-SW 向走滑断裂改造; 通过恢复太古宙陆壳的原始格局, 得出鞍山地区始太古宙岩石单元能够与冀东绥中地区各类岩石单元进行对比, 胶北地体与鲁西地体能够进行对比; 恢复后太古宙地体整体显示 NNW-SSE 走向特征, 与区域内太古宙片麻岩中片麻理方向一致。

(2) 通过对鞍山地区弓长岭 BIF 铁矿太古宙表壳岩构造和年代学的研究, 揭示新太古代末期, 至少在华北克拉通东部地区已经存在一定规模的 E-W 向侧向挤压, 形成 NNW-SSE 走向线性构造及片麻理。

致谢 谨以此文恭贺沈其韩先生百岁寿辰。感谢刘超辉研究员、冀磊博士、许王博士在文章写作过程中提供的重要帮助, 感谢硕士研究生文飞在实验

方面提供的帮助。感谢中科院地质所彭澎研究员和地大武汉王军鹏副教授所提意见和建议。

References

- Corfu F, Hancher J M, Hoskin P W O, *et al.* 2003. Zircon[M]. Washington: Mineralogical Society of America, 469~500.
- Dong Chunyan, Wan Yusheng, Xie Hangqiang, *et al.* 2017. The Mesoproterozoic Tiejiaoshan-Gongchangling potassic granite in the Anshan-Benxi area, North China Craton: Origin by recycling of Paleoproterozoic to Eoproterozoic crust from U-Pb-Nd-Hf-O isotopic studies[J]. *Lithos*, 290~291: 116~135.
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Li Hailong, *et al.* 2018. The Yanshan orogeny and late Mesozoic multiplate convergence in East Asia—Commemorating 90th years of the “Yanshan Orogeny” [J]. *Science China Earth Sciences*, 61: 1 888~1 909.
- Han Chunming, Xiao Wenjiao, Shu Benxun, *et al.* 2014. Neoproterozoic Algoma-type banded iron formations from Eastern Hebei, North China

- Craton: SHRIMP U-Pb age, origin and tectonic setting[J]. *Precambrian Research*, 251: 212~231.
- Huang Baochun, Piper J D A, Zhang Chunxia, *et al.* 2007. Paleomagnetism of Cretaceous rocks in the Jiaodong Peninsula, eastern China: Insight into block rotations and neotectonic deformation in eastern Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112: B03106.
- Jiang Yan, Xue Linfu, Zhu Ming, *et al.* 2016. Deep geological features of Hanling-Pianling fault zone in eastern Liaoning[J]. *Global Geology*, 35(2): 495~502 (in Chinese with English abstract).
- Kusky T, Li Janghai and Santosh M. 2007. The Paleoproterozoic North Hebei Orogen: North China craton's collisional suture with the Columbia supercontinent[J]. *Gondwana Research*, 12(1): 4~28.
- Kusky T M, Polat A, Windley, B F, *et al.* 2016. Insights into the tectonic evolution of the North China Craton through comparative tectonic analysis: A record of outward growth of Precambrian continents[J]. *Earth-Science Reviews*, 162: 387~432.
- Li Sanzhong, Santosh M, Zhao G C, *et al.* 2012. Intracontinental deformation in a frontier of super-convergence: A perspective on the tectonic milieu of the South China Block[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 313~329.
- Li Sanzhong, Zhao Guochun, Sun Min, *et al.* 2005. Deformation history of the, Paleoproterozoic Liaohé assemblage in the eastern block of the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 659~674.
- Li Zhengxiang. 1994. Collision between the North and South China blocks: A crustal-detachment model for suturing in the region east of the Tanlu fault[J]. *Geology*, 22(8): 739~742.
- Liu Dunyi, Nutman A P, Compston W, *et al.* 1992. Remnants of $\geq 3\ 800$ Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton[J]. *Geology*, 20(4): 339~342.
- Liu Fulai, Liu Pinghua, Wang Fang, *et al.* 2015. Progress and overviews of voluminous meta-sedimentary series within the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji orogenic/mobile belt, North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2 816 ~2 846(in Chinese with English abstract).
- Liu Shuwen, Wang Wei, Bai Xiang, *et al.* 2018. Lithological assemblages of Archean meta-igneous rocks in Eastern Hebei-Western Liaoning Provinces of North China Craton, and their geodynamic implications[J]. *Earth Science*, 43 (1): 44~56(in Chinese with English abstract).
- Marshak S, Alkmim F and Jordt-Evangelista H. 1992. Proterozoic crustal extension and the generation of dome-and-keel structure in an Archean granite-greenstone terrane[J]. *Nature*, 357: 491~493.
- Oh C W. 2006. A new concept on tectonic correlation between Korea, China and Japan: Histories from the late Proterozoic to Cretaceous [J]. *Gondwana Research*, 9(1~2): 47~61.
- Peng Peng, Wang Chong, Wang Xinping, *et al.* 2015. Qingyuan high-grade granite-greenstone terrain in the Eastern North China Craton: Root of a Neoarchean arc[J]. *Tectonophysics*, 662(1): 7~21.
- Shu Peng, Min Wei, Liu Yugang, *et al.* 2020. Late Quaternary paleoseismology and faulting behavior of the Yilan-Yitong fault zone and implications for seismic hazards of the Tanlu fault zone, eastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 201(1): 104509.
- Song Biao, Nutman A P, Liu Dunyi, *et al.* 1996. 3 800 to 2 500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China[J]. *Precambrian Research*, 78(1): 79~94.
- Tian Zhonghua. 2021. Structural complexity of the suture zone: A case study from the multi-phase modified suture zone in the Sulu Area[J]. *Chinese Journal of Geology*, 56 (2): 635~666(in Chinese with English abstract).
- Tian Zhonghua, Liu Fulai, Liu Pinghua, *et al.* 2020. A Paleoproterozoic nappe on Meso-Archean gneisses exhumed by a Cretaceous metamorphic core complex in northeastern North China Craton[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 109(4): 1 403~1 420.
- Tian Zhonghua, Liu Fulai, Yan Zhen, *et al.* 2021. Palaeoproterozoic turbidite deposition in the Liaodong Peninsula, northeastern North China craton—Constraints from the Gaojiayu Formation of the Liaohé Group [J]. *Precambrian Research*, 352: 106008.
- Tian Zhonghua and Nutman A P. 2022. Structural restoration of an Eo-Mesoarchean (3.8~2.9 Ga) terrane, Eastern China, dissected by the Tanlu fault zone [J]. *Journal of Structural Geology*, 161: 104629.
- Tian Zhonghua, Xu Wang, Liu Lishuang, *et al.* 2020. Paleoproterozoic back-arc basin opening and closure: Evidence from the structural research of the volcanic-sedimentary rocks in the Helan Town, Liaodong Peninsula[J]. *Earth Science*, 45(9): 3 217~3 238(in Chinese with English abstract).
- Wan Yusheng, Dong Chunyan, Liu Dunyi, *et al.* 2012a. Zircon ages and geochemistry of late Neoarchean syenogranites in the North China Craton: A review[J]. *Precambrian Research*, 222~223: 265~289.
- Wan Yusheng, Liu Dunyi, Nutman A, *et al.* 2012b. Multiple 3.8~3.1 Ga tectono-magmatic events in a newly discovered area of ancient rocks (the Shengousi Complex), Anshan, North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 54~55(2): 18~30.
- Wang Feng, Xu Wenliang, Ge Wenchun, *et al.* 2016. The offset distance of the Dunhua-Mishan Fault: Constraints from Paleozoic-Mesozoic magmatism within the Songnen-Zhangguangcai Range, Jiamusi, and Khanka massifs[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(4): 1 129~1 140 (in Chinese with English abstract).

- Wang Zhicai, Deng Qidong, Du Xiansong, *et al.* 2006. Active fault survey on the Tan-Lu fault zone in Laizhou Bay[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 28 (5): 493~503, 560(in Chinese with English abstract).
- Xu Ming, Li Yanlin, Hou Hesheng, *et al.* 2017. Structural characteristics of the Yilan-Yitong and Dunhua-Mishan faults as northern extensions of the Tancheng-Lujiang Fault Zone: New deep seismic reflection results[J]. *Tectonophysics*, 706~707(5): 35~45.
- Yin An and Nie Shangyou. 1993. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam Fault Systems, eastern Asia[J]. *Tectonics*, 12(4): 801~813.
- Yu Zhongyuan, Yin Na, Shu Peng, *et al.* 2018. Late Quaternary paleoseismicity and seismic potential of the Yilan-Yitong Fault Zone in NE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 151: 197~225.
- Zhai Minguo, Santosh M and Zhang Lianchang. 2011. Precambrian geology and tectonic evolution of the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 20(1): 1~5.
- Zhai Minguo, Zhao Lei, Zhu Xiyan, *et al.* 2021. Late Neoproterozoic magmatic-metamorphic event and crustal stabilization in the North China Craton[J]. *American Journal of Science*, 321(1~2): 206~234.
- Zhang Guoren, Jiang Shu'e, Yang Zhanxing, *et al.* 2004. The features and forming mechanism of the Hanling-Pianling strike-slip fault zone in Liaoning Province, Northeast China[J]. *Geoscience Frontiers*, (3): 183~192(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuai, Zhu Guang, Liu Chen, *et al.* 2018. Strike-slip motion within the Yalu River fault zone, NE Asia: The development of a shear continental margin[J]. *Tectonics*, 37(6): 1 771~1 796.
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen and Shi Wei. 2003. Cretaceous deformation history of the middle Tan-Lu fault zone in Shandong Province, eastern China[J]. *Tectonophysics*, 363(3): 243~258.
- Zhao Chen, Zhang Jian, Zhao Guochun, *et al.* 2021. Kinematics and structural evolution of the Anziling dome-and-keel architecture in east China: Evidence of Neoproterozoic vertical tectonism in the North China Craton[J/OL]. *GSA Bulletin*. <https://doi.org/10.1130/B36225.1>
- Zhao Guochun, Cawood P A, Li Sanzhong, *et al.* 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion[J]. *Precambrian Research*, 222~223: 55~76.
- Zhao Tian, Zhu Guang, Lin Shaoze, *et al.* 2016. Indentation-induced tearing of a subducting continent: Evidence from the Tan-Lu Fault Zone, East China[J]. *Earth-Science Reviews*, 152: 14~36.
- Zhu Guang, Hu Wei, Song Lihong, *et al.* 2015. Quaternary activity along the Tan-Lu fault zone in the Bohai Bay, East China: Evidence from seismic profiles[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114 (part 1): 5~17.
- Zhu Guang, Liu Guosheng, Niu Manlan, *et al.* 2009. Syn-collisional transform faulting of the Tan-Lu fault zone, East China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98(1): 135~155.
- Zhu Guang, Niu Manlan, Xie Chenglong, *et al.* 2010. Sinistral to normal faulting along the Tan-Lu fault zone: Evidence for geodynamic switching of the East China continental margin[J]. *Journal of Geology*, 118 (3): 277~293.
- Zhu Guang, Wang Wei, Gu Chengchuan, *et al.* 2016. Late Mesozoic evolution history of the Tan-Lu Fault Zone and its indication to destruction processes of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(4): 935~949 (in Chinese with English abstract).
- Zhu G, Wang Y, Liu G, *et al.* 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of strike-slip motion on the Tan - Lu fault zone, East China[J]. *Journal of Structural Geology*, 27: 1 379~1 398.
- Zhu Rixiang, Zhang Hongfu, Zhu Guang, *et al.* 2017. Craton destruction and related resources[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 106(7): 2 233~2 257.

附中文参考文献

- 董树文,张岳桥,李海龙,等. 2019. “燕山运动”与中亚大陆晚中生代多板块汇聚构造——纪念“燕山运动”90周年[J]. *中国科学: 地球科学*, 49(6): 913~938.
- 姜岩,薛林福,祝铭,等. 2016. 辽宁东部寒岭—偏岭断裂带深部地质特征[J]. *世界地质*, 35(2): 495~502.
- 刘福来,刘平华,王舫,等. 2015. 胶-辽-吉古元古代造山/活动带巨量沉积岩系的研究进展[J]. *岩石学报*, 31(10): 2 816~2 846.
- 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[J]. *地球科学*, 43(1): 44~56.
- 田忠华. 2021. 缝合带结构的复杂性: 以苏鲁地区多期改造缝合带为例[J]. *地质科学*, 56(2): 635~666.
- 田忠华,许王,刘利双,等. 2020. 辽东半岛河栏镇火山-沉积岩构造研究——对古元古代弧后盆地张裂与闭合的启示[J]. *地球科学*, 45(9): 3 217~3 238.
- 王枫,许文良,葛文春,等. 2016. 敦化-密山断裂带的平移距离: 来自松嫩-张广才岭-佳木斯-兴凯地块古生代-中生代岩浆作用的制约[J]. *岩石学报*, 32(4): 1 129~1 140.
- 王志才,邓起东,杜宪宋,等. 2006. 莱州湾海域郯庐断裂带活断层探测[J]. *地震学报*, (5): 493~503, 560.
- 张国仁,江淑娥,杨占兴,等. 2004. 辽宁寒岭—偏岭平移断裂带特征及其形成动力机制[J]. *地学前缘*, 3: 183~192.
- 朱光,王薇,顾承申,等. 2016. 郯庐断裂带晚中生代演化历史及其对华北克拉通破坏过程的指示[J]. *岩石学报*, 32(4): 935~949.