

中亚造山带东部微陆块在 Columbia—Rodinia 超大陆演化中的岩浆—沉积记录



Pre-pub. on line: www.
geojournals.cn/georev

王志伟^{1,2)}, 刘振宇^{1,2)}, 杨振宁^{1,2)}, 张立杨^{1,2)}, 王智慧^{1,2)},

徐备^{1,2)}, 李灿清³⁾, 孙瑜欣^{1,2)}, 徐引^{1,2)}, 朱泰昌^{1,2)}

1) 河北地质大学河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 石家庄, 050031;

2) 河北地质大学地球科学学院, 河北省战略性关键矿产研究协同创新中心, 石家庄, 050031;

3) 云南省核工业二〇九地质大队, 昆明, 650000

内容提要:中亚造山带东部分布有多个具有前寒武纪基底的微陆块(额尔古纳、兴安、松嫩和佳木斯地块),其上存在大量元古宙地质记录,包括 2.5~2.4 Ga、1.8 Ga、1.5~1.4 Ga、0.9~0.6 Ga 岩浆事件和中—新元古代沉积序列,它们是回答微陆块与 Columbia 和 Rodinia 超大陆演化联系和地球中年期演化的关键对象。额尔古纳、兴安和松嫩地块发育相似的 2.5~1.8 Ga 基底岩石且其间缺少古老的蛇绿岩,它们可能构成了一个联合陆块,其陆核至少在 2.7 Ga 前已经形成,从华北克拉通北部裂解出去并在其周缘演化,2.5 Ga 和 1.8 Ga 经历了洋陆俯冲作用,未参与克拉通化过程。1.87~1.80 Ga 岩浆作用很可能是 Columbia 超大陆周缘俯冲作用于古老的微陆块之下的产物;兴安地块西部和白乃庙岛弧带 1.45~1.32 Ga A 型花岗岩—流纹岩组合及其向陆缘 Hf 同位素持续亏损的趋势与劳伦南部 Granite—Rhyolite Province 和波罗的克拉通西南 Fennoscandia 十分相似,可能是 Columbia 超大陆周缘俯冲后撤伸展的产物,俯冲后撤和陆下地幔上涌共同促进了 Columbia 超大陆的伸展和裂解。兴安地块西部发育岩石组合、碎屑锆石年龄和 Hf 同位素变化与格林威尔造山有关的同碰撞和碰撞后沉积序列相似的沉积地层,而且碎屑锆石微量元素和 Hf 同位素随时代的系统性变化也揭示了 1.10~0.98 Ga 地壳明显加厚,伴有大量古老地壳物质重熔,0.9~0.8 Ga 地壳持续减薄,以古老地壳再造为主,这与 Rodinia 超大陆聚合阶段格林威尔造山(1080~980 Ma)及随后的垮塌伸展过程基本吻合。松嫩地块东北部 954 Ma 正长花岗岩很可能是松嫩与佳木斯地块陆—陆碰撞后阶段沉积岩部分熔融的产物,可能代表了 Rodinia 超大陆碰撞聚合在中亚造山带东部的响应。超大陆周缘前进式俯冲引发佳木斯地块与松嫩—兴安—额尔古纳联合陆块在 954 Ma 前碰撞拼贴,同时在外缘的佳木斯地块上产生 953~939 Ma 中钾—高钾钙碱性基性—中性—酸性岩组合,920~880 Ma 在各地块上广泛发育中酸性钙碱性岩浆作用。从 850 Ma 开始,后撤式俯冲导致大量高温的钙碱性酸性岩、双峰式岩浆岩组合产出于松嫩和额尔古纳地块上,直至 777 Ma 和 697 Ma 之前开始不断裂解产生古牡丹江洋和古新林洋,而且 790~560 Ma 期间在额尔古纳地块西北缘、松嫩地块东缘均发育被动大陆边缘沉积,记录了 Rodinia 超大陆的聚合、伸展—裂解过程。另外,中亚造山带东部乃至全球其他块体上大量 1.5~1.3 Ga 和 1.0~0.7 Ga 与超大陆聚合、伸展—裂解有关的“低谷期”地质记录被不断发掘出来,暗示了地球中年期并不是前人认为的构造宁静期。

关键词:中亚造山带东部;微陆块;地球中年期;元古宙;Columbia—Rodinia 超大陆;聚合和裂解

超大陆(Supercontinent),是由全球绝大多数陆块构成的统一的超级大陆。这个概念以及潘吉亚超大陆首先由魏格纳在 20 世纪初提出(Wegener, 1912)。直到板块构造理论提出后,20 世纪 70~80 年代英国古地磁学家 Piper 等人基于全球主要古老

地盾(劳伦、波罗的、澳大利亚、西伯利亚、印度、南美和非洲)相似的古地磁极移曲线,提出了元古宙也存在超大陆的假说。后续大量的研究提出潘吉亚之前存在多个超大陆,包括 Kenorland(2.7~2.1 Ga; Williams et al., 1991)、Columbia 或 Nuna(2.1~1.5

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41802053)、河北地质大学国家预研项目(编号:KY2023002)和河北地质大学科技创新团队项目(编号:KJCTXD-2021-05)的成果。

收稿日期:2023-01-08;改回日期:2023-04-17;网络首发:2023-05-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2023.05.001

作者简介:王志伟,男,1990 年生,博士,教授,主要从事岩浆岩石学与地球化学研究;Email: wangzw14@mails.jlu.edu.cn。

Ga; Hoffman, 1991; Rogers et al., 2002; Zhao Guochun et al., 2003, 2004; 赵国春等, 2022)、Rodinia (1.2~0.7 Ga)、Gondwana 或 Pannotia (0.75~0.52 Ga), 而 Gondwana 近年来也被认为是一个巨大大陆 (Megacontinent), 因为它并不是全球性的大陆 (Wang Chong et al., 2020)。超大陆的最终聚合往往会产生全球规模的碰撞造山作用, 造成强烈的地壳缩短、高级变质作用、S 型花岗岩侵位, 例如 1.1~0.9 Ga 格林威尔碰撞造山作用 (Cawood et al., 2016; Hoffman, 2019; Spencer et al., 2021); 超大陆的裂解则可以产生大陆边缘裂谷带、放射状基性岩墙群 (侵入到不同块体内) 和大火成岩省 (Li Zhengxiang et al., 2008)。目前, Rodinia 和 Gondwana 聚合和裂解过程是研究最为充分的。

另一方面, 哥伦比亚 (Columbia) 和罗迪尼亚 (Rodinia) 超大陆旋回发生在地球中年期 (Earth's middle age, 1.8~0.75 Ga), 这一地质时期传统上被称为平静的 10 亿年 (boring billion) (Holland, 2006), 全球被动大陆边缘不甚发育, 缺少冰川沉积和条带状铁建造以及磷酸盐沉积, 古海水没有明显的 Sr 同位素异常; 陆内和板块边界内侧非造山岩浆活动 (A 型花岗岩、斜长岩—纹长二长岩—紫苏花岗岩—花岗岩 AMCG 组合) 发育, 造山型金矿分布较少 (Cawood et al., 2014), 花岗岩年龄峰期和新增生地壳占比整体偏低, 被认为是没有大量新生地壳物质产生的结果 (Taylor et al., 1995; Condie, 1998)。另外, 一些学者建立了锆石微量元素与地壳厚度及造山作用的联系, 也得出了地球中年期是造山宁静的认识, 造山作用分布有限, 剥蚀和沉积速率也较低 (Tang Ming et al., 2021; Zhu Ziyi et al., 2020, 2022)。然而, 地球中年期确实是一个构造活动的宁静期吗? 近年来大量岩浆作用、变质作用和地质演化的研究结果对此提出了挑战 (Spencer et al., 2021; Wang Zhiwei et al., 2022a, b)。

前人的古地磁、岩石学、古地理重建等工作表明, 华北、华南和塔里木均为哥伦比亚 (Columbia) 和罗迪尼亚 (Rodinia) 超大陆的组成部分。例如华北西部陆块和东部陆块 1.85 Ga 碰撞事件与 Columbia 最终聚合吻合, 华北克拉通 1.8~1.6 Ga 熊耳—燕辽裂谷带及 AMCG 组合 (斜长岩—纹长二长岩—紫苏花岗岩—花岗岩)、环斑花岗岩、A 型花岗岩、广泛分布的基性岩墙群, 均与 Columbia 超大陆的裂解有关 (陆松年等, 2002; Zhao Guochun et al., 2003, 2013; 耿元生等, 2019)。华夏和扬子地块 1.3~0.9

Ga 与造山运动有关的岩浆—变质作用、830~750 Ma 岩浆活动和裂谷沉积是其参与 Rodinia 超大陆最终聚合和裂解的地质记录 (陆松年, 1998; Li Zhengxiang et al., 2008; 李献华, 2012; 李献华等, 2021)。

作为东亚大陆的重要组成部分, 中亚造山带是全球最大的显生宙增生造山带, 其中分布有多个具有前寒武纪基底的微陆块, 其上存在大量元古宙地质记录, 是回答它们与 Columbia 和 Rodinia 超大陆演化联系和地球中年期演化的天然实验室。中亚造山带东部也被称为兴蒙造山带, 前人将其从西向东划分为额尔古纳地块、兴安地块 (或兴安—艾力格庙地块)、松嫩地块 (也称松辽地块) 和佳木斯地块 (也称佳木斯—兴凯地块) (图 1; 李双林等, 1998; 徐备等, 2014; 许文良等, 2019)。虽然这些块体主体是以显生宙蛇绿岩带为界线划分的, 但近年来在缝合带内也识别出大量新元古代蛇绿岩组合, 而且地块内部确实含有前寒武纪古老地质体和岩石圈地幔, 因此本文沿用该划分方案。

越来越多的前寒武纪地质记录在上述地块内被识别出来, 包括 2.5~2.4 Ga、1.8 Ga、1.5~1.4 Ga、0.9~0.6 Ga 岩浆事件和中—新元古代沉积作用。这些地质记录是揭示中亚造山带东部微陆块基底组成及其与超大陆演化联系的关键对象。不同于潘吉亚超大陆的重建, 它有保存完整的相对年轻的地质记录和可靠的古地磁证据, 前寒武纪微陆块尤其是卷入到造山带内的, 普遍受到后期造山作用的叠加改造, 地质记录不完整, 也缺乏可靠的古地磁资料, 重建它们在相对古老的超大陆中的位置及演化过程是相对困难且充满争议的。然而从全球范围来看, 在古老大陆边缘、大洋板块内部、造山带内均存在大量的微陆块, 它们都是与大陆的裂解作用有关, 随后增生拼贴到大陆边缘, 或被大洋岩石圈捕获, 或被相对年轻的造山带包卷 (李三忠等, 2018)。在超大陆重建过程中, 它们都发挥了至关重要的作用, 因为它们是超大陆边缘裂解、周缘俯冲增生的直接产物 (Cawood et al., 2010; Zhao Guochun et al., 2018)。

中国东北地区已积累了大量中—新元古代岩浆活动和沉积作用的研究数据, 但前期研究均集中在单个块体的区域构造演化上, 将其与超大陆的聚合和裂解相联系。目前仍缺少全面整合多个块体的岩浆岩和沉积岩时空分布、以及地块之间演化联系的研究, 因此, 目前并不清楚中亚造山带东部几个前寒武纪微陆块在中—新元古代是作为一个整体还是单

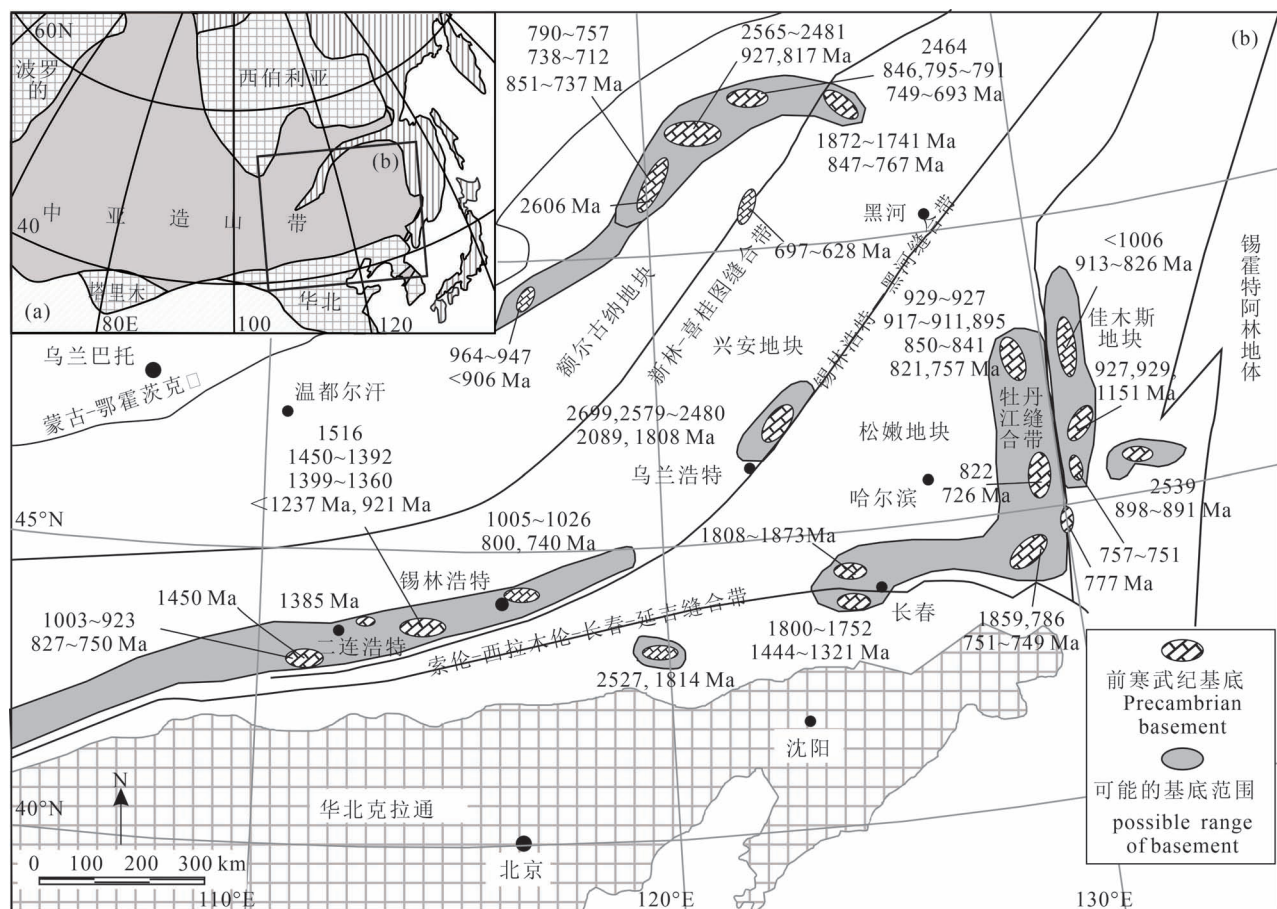


图 1 中亚造山带大地构造位置示意图(a)(据 Safonova et al., 2014 修改)和中国东北地区前寒武纪微陆块分布图(b)(据 Xu Bei et al., 2015 和 Zhou Jianbo et al., 2018 修改)

Fig. 1 General map showing the tectonic location of Central Asian Orogenic Belt (a) (modified after Safonova et al. , 2014) and tectonic sketch map of the Precambrian micro-continent in NE China (b) (modified after Xu Bei et al. , 2015; Zhou Jianbo et al. , 2018)

独演化? 如何参与 Columbia 和 Rodinia 超大陆演化? 鉴于此, 本文将在前期工作基础上, 综合前人对中亚造山带东部前寒武纪微陆块上 0.9~0.6 Ga 岩浆和沉积作用的时空分布和地球化学数据的时空变异及区域对比研究工作, 探讨前寒武纪基底岩石组合及时空分布、构造亲缘性、何时及如何参与到 Columbia 和 Rodinia 超大陆演化中, 同时为地球中年期演化提供中亚造山带东部的制约。

1 微陆块基底构成及亲缘性

1.1 微陆块基底构成

目前的研究已经确定了中亚造山带东部前寒武纪微陆块基底由新太古代—新元古代多期岩浆岩(2.5~2.4 Ga、1.8 Ga、1.5~1.4 Ga、0.9~0.6 Ga)和中—新元古代沉积岩组成(图1和图2)。虽然有报

道黑龙江龙江地区存在新太古代 2699 Ma 二长花岗岩,但大部分锆石遭受后期改造偏离谐和线,且 $n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$ 年龄变化范围较大(介于 2391 ~ 2794 Ma),锆石特征不明,其形成年龄还有待进一步验证(Wu Xinwei et al., 2018)。

1.1.1 岩浆岩记录

(1) 2.5~2.4 Ga, 该期中基性—酸性岩浆岩已被证实存在于中亚造山带东部微陆块内(图1和图2)。额尔古纳地块北部钻孔中发现有新太古代变质中基性岩和花岗岩,呈一定规模的捕掳体残留于中生代火山岩中(邵军等, 2015; Liu Huichuan et al., 2021)。其中新太古代斜长角闪岩(2537~2565 Ma), 原岩为辉长岩/玄武岩,除了富集大离子亲石元素外,其他特征与 N-MORB 基本一致,可能是受俯冲流体交代的岩石圈地幔在~65 km 高程度

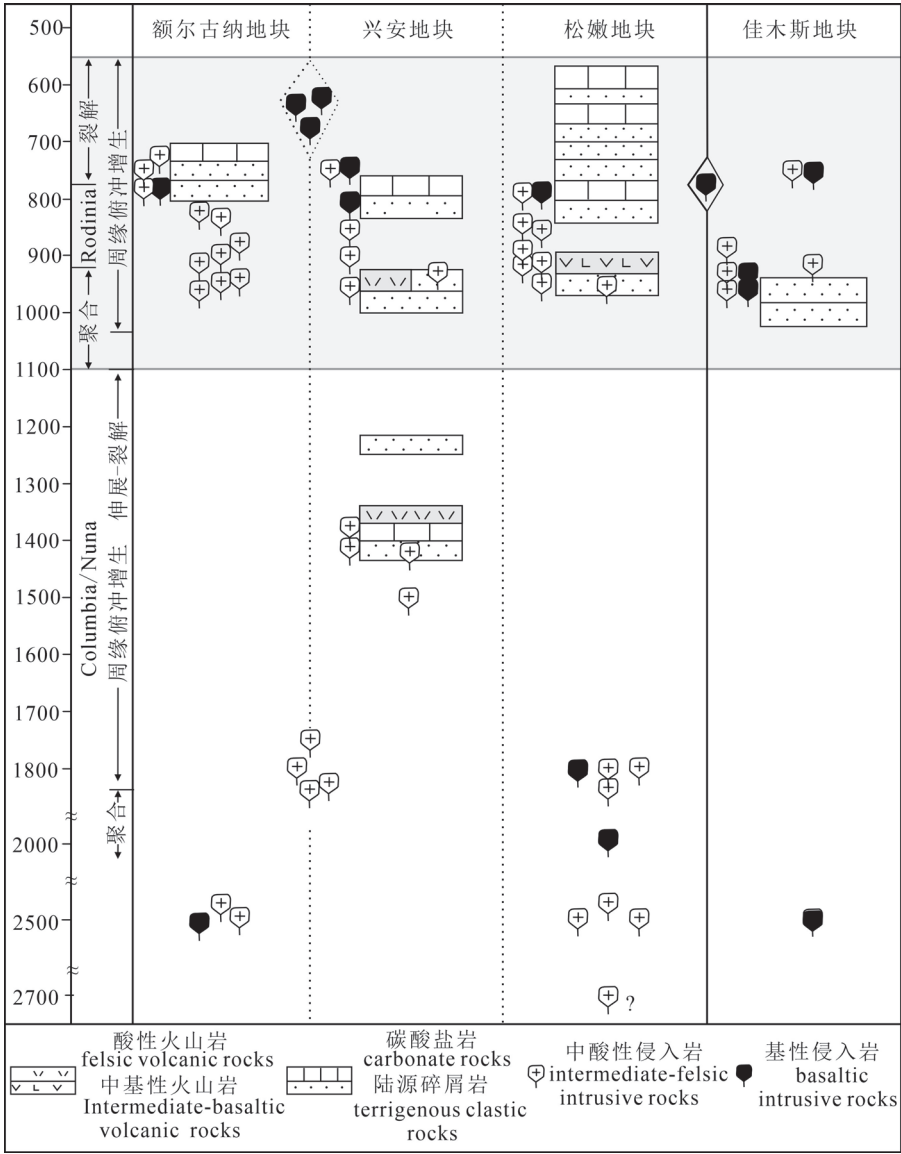


图 2 中亚造山带东部微陆块岩浆和沉积记录柱状图

Fig. 2 Column of magmatic and sedimentary records in micro-continents within eastern Central Asian Orogenic Belt

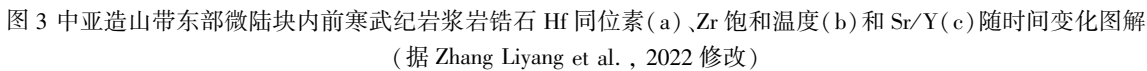
(20%) 部分熔融的产物,而 2481~2539 Ma 变质闪长岩明显富集轻稀土和大离子亲石元素,亏损重稀土和高场强元素,岩浆起源于新生基性下地壳的部分熔融;Nd—Hf 同位素出现解耦,与大洋沉积物加入到地幔源区有关,暗示了它们形成于与俯冲有关的伸展环境(Liu Huichuan et al., 2021)。龙江地区近年来也报道有 2579 Ma 奥长花岗岩、2480 Ma 石英二长岩和 2544 Ma 二长花岗岩,它们相对亏损的锆石 Hf 同位素组成揭示了其岩浆起源于中—新太古代新生地壳的部分熔融(图 3a;钱程等,2018;吴新伟等,2022),该作者在乌兰浩特也识别出一套古

元古代(2029 Ma)斜长角闪岩,其中产出了大量 2.5 Ga 捕获 锆 石。此外, Han Shijiong 等(2019)报道了佳木斯地块穆棱地区存在 2539 Ma 斜长角闪岩,同样显示出弧岩浆岩属性及亏损的锆石 Hf 同位素组成(图 3a),表明其形成也与俯冲作用有关。

(2) 1.8 Ga, 该期岩浆活动在兴安地块东北部和松嫩地块零星发育(图 1 和图 2)。如兴安地块东北部(也有学者认为是额尔古纳地块东北部)1872~1741 Ma 片麻状花岗质岩石具有负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(平均为-6.18),是中太古代(2.8~3.0 Ga)古老地壳物质再造的产物(图 3a;孙立新等, 2013; 张超等, 2018; Li Gongyu et al., 2019)。张超等(2018)报道龙江地区发育 1808 Ma A 型二长花岗岩,表现出与兴安地块同时代花岗岩相似的锆石 Hf 同位素组成(图 3a)。松嫩地块南部也存在古元古代结晶基底,由 1.8 Ga 变辉长岩—闪长岩—花岗岩构成(Wang Ying et al., 2006; Pei Fuping et al., 2007),也有学者认为它们是南部华北克拉通的推覆体,而松嫩地块东南部塔东地区

1859 Ma 片麻状花岗岩的发现确定了该地块存在 1.8 Ga 岩浆事件(许文良等,2019)。

(3) 1.5~1.4 Ga, 该期酸性岩浆活动仅在兴安地块西部和华北板块北缘白乃庙岛弧带上有报道(图 1 和图 2;孙立新等,2018,2020; Han Jie et al., 2017; Yang Zhenning et al., 2021; Li Changhai et al., 2021; Wang Zhiwei et al., 2022 a, b)。兴安地块西部苏左旗地区报道有 1516 Ma 细粒二长花岗岩,其锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 2.8~8.5,二阶段模式年龄 T_{DM2} 介于 1.82~2.02 Ga(图 3a;孙立新等, 2013)。苏左旗南部和阿巴嘎旗还分布有较大面积



的 1399~1360 Ma A 型花岗岩,作者近年来在二连南部和东北部也发现 1450 Ma 正长花岗岩和 1385 Ma 变质流纹岩,它们共同构成了一套 A 型花岗岩—流纹岩组合,岩浆结晶温度较高,在 810~939℃ (图 3b),均具有相对亏损的锆石 Hf 同位素组成以及向西更加亏损的趋势,作者认为这一变化可能与俯冲横向增生有关 (Yang Zhenning et al., 2021; Wang Zhiwei et al., 2022a, b),也有学者提出其为陆内伸展机制的产物 (孙立新等, 2018, 2020; Han Jie et al., 2017)。Li Changhai 等 (2021) 和 Ma Haitao 等 (2022) 在吉林南部辽源地区首次发现中元

(4) 0.9~0.7 Ga, 与古—中元古代岩浆活动相比, 拉伸纪岩浆活动更加强烈, 在中亚造山带内多个微陆块均有分布(图 1 和图 2)。

额尔古纳地块是中亚造山带东部微陆块中新元古代岩浆活动最为频繁的,可划分为 964~947 Ma、929~880 Ma、850 Ma、819 Ma、792~737 Ma,前四期岩性以花岗岩为主,而后者岩石组合以辉长岩—花岗岩组成的双峰式侵入岩组合为特征(许文良等, 2019; Wu Fuyuan et al., 2011; Gou Jun et al., 2013; Tang Jie et al., 2013; Zhao Shuo et al., 2016; Liu Huichuan et al., 2020)。Liu Huichuan 等(2020)以 850 Ma 为界划分为两个阶段,认为 964~887 Ma 酸性岩浆岩可能是大陆弧岩浆作用的产物,而 850 Ma 后大量 A 型花岗岩和双峰式火成岩记录了持续的伸展过程(图 3)。

兴安地块东北部和西部零星发育有新元古代早期的岩浆活动。地块西部苏左旗 921 Ma I 型黑云母二长花岗岩侵入到新元古代昌特敖包组内, Yang Zhenning 等(2021)基于富水与高温(844~857℃)的岩浆性质认为它们是大陆弧的组成部分(图 3)。此外,该地块中东部也有少量 847~767 Ma 花岗质片麻岩和 740 Ma 变质辉长岩的报道(孙立新等, 2013; 周文孝等, 2013; Zhou Jianbo et al., 2011, 2018), 兴安地块向西可延伸至英巴地区、蒙古南部托托尚地块和南戈壁地块,前人已经报道存在 952~905 Ma 二云母花岗岩和石榴子石电气石花岗岩(周印章等, 2013; Yarmolyuk et al., 2005)。

松嫩地块新元古代岩浆活动主要分布于东部小兴安岭和张广才岭地区。近年来相继识别出了 5 期新元古代花岗质侵入体: 954~950 Ma、929~911 Ma、895 Ma、856~841 Ma、790 Ma。前三期以钙碱性二长岩—石英二长岩—花岗闪长岩—正长花岗岩为主,主体以古元古代地壳为源区,不同的是 954~950 Ma 过铝质花岗岩显示出埃达克质岩的地化特征,岩浆起源于黏土富集的硬砂岩部分熔融,可能与松嫩地块与佳木斯地块陆—陆碰撞过程有关,而 929~895 Ma 中酸性岩的形成与加厚下地壳的部分熔融有关(图 3c),可能是大陆边缘弧岩浆作用的产物(Zhang Liyang et al., 2022; Luan Jinpeng et al., 2017a, 2019)。而 841 Ma 花岗岩及 790 Ma 双峰式侵入岩组合可能形成于非造山或造山后环境(图 3; 王少铁等, 2014; Luan Jinpeng et al., 2017b, 2022)。

佳木斯地块也报道有布列亚 953~920 Ma 变质辉长岩—花岗岩、佳木斯 898~891 Ma 和 757~751 Ma 片麻状花岗岩,佳木斯花岗岩后期遭受了 563~476 Ma 高级变质作用的叠加改造(Yang Hao et al., 2017, 2018)。俄罗斯布列亚 953~920 Ma 双峰式变

质岩浆岩可能是松嫩地块与佳木斯地块陆—陆碰撞后伸展的产物(Sorokin et al., 2019)。0.89 Ga 正长花岗岩岩浆起源于低压下沉积岩部分熔融,可能形成于活动大陆边缘环境,而佳木斯地块 752 Ma A 型花岗岩、777 Ma 斜长角闪岩(原岩为 MORB 型辉长岩或玄武岩)与 757 Ma 变质玄武岩共同构成了双峰式岩浆岩组合,形成于拉张环境(图 3; 颧颧强等, 2008; Khanchuk et al., 2010; Yang Hao et al., 2017, 2018)。

(5) 0.6 Ga, 目前仅在额尔古纳和兴安地块之间的新林—喜桂图缝合带报道有少量镁铁—超镁铁质岩(图 2 和图 3)。新林蛇绿岩中出露了蛇纹石化橄榄岩、辉长岩、辉绿岩,其中辉长岩形成时代为 669 Ma,高 Y 和 Yb 及低 U/Yb 与洋壳来源锆石特征一致,同时辉长岩还显示出 N-MORB 的地化特征(Gou Jun et al., 2020)。Feng Zhiqiang 等(2018)也在此缝合带阿里河混杂岩带内识别出嘎仙 697 Ma 变质辉长岩、628 Ma 辉石岩,吉峰 647 Ma 辉长岩;辉石岩和辉长岩具有岛弧岩浆属性和强烈亏损的 Hf 同位素组成,玄武岩和辉绿岩除有 Nb、Ta 和 Ti 亏损外,整体显示出 OIB 特征,暗示了其源区经历了软流圈和岩石圈相互作用,以上地化特征与洋内俯冲作用是吻合的,它们代表了超俯冲带蛇绿岩的残片。

另一方面,兴蒙造山带微陆块中存在新太古代—古元古代基底物质也得到了近年来岩石圈地幔研究的证实,如 Deng Fei 等(1992)和 Zhang Yanlong 等(2011)报道了兴安地块和松嫩地块新生代玄武岩中地幔橄榄岩捕虏体存在新太古代(2.7~2.6 Ga)、古—中元古代(2.1~1.9 Ga、1.6~1.4 Ga) Re 亏损模式年龄,Guo Peng 等(2017)报道了佳木斯—兴凯地块新生代玄武岩中地幔橄榄岩捕虏体也存在古元古代 Re 亏损模式年龄(1.9 Ga)。

1.1.2 沉积记录

(1) 中元古界。中元古代沉积作用(1.4 Ga 和 1.00~0.92 Ga)较为特殊,目前仅报道在兴安地块西部出露(图 1 和图 2),以宝音图群和艾力格庙群变质碎屑岩夹碳酸盐岩和火山岩为代表。

宝音图群大面积分布在内蒙中部苏左旗—锡林浩特一带,岩石组合在空间上变化较大。在苏左旗地区以乌花敖包岩组的斜长片麻岩夹大理岩、阳起石片岩、绿帘绿泥片岩和石英片岩,以及昌特敖包组黑云斜长片麻岩、石英岩、大理岩、斜长角闪岩等为主(孙立新等, 2013; Yang Zhenning et al., 2021)。

在苏左旗南部乌花敖包岩组石英片岩被 1.4 Ga 片麻状花岗岩侵入,其沉积时代可以限定在 1405 ~ 1392 Ma,碎屑锆石的物质来源主要为研究区花岗质岩石风化的产物(Yang Zhenning et al., 2021)。在锡林浩特一带,宝音图群被称为锡林郭勒杂岩,岩石组合为黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩、磁铁石英岩、石榴子石黑云二长片麻岩等(内蒙古地质矿产局, 1991;葛梦春等,2011),目前已从中解体出了新元古代(800~740 Ma)变质辉长岩(周文孝等,2013;作者未发表资料)。

艾力格庙群分布于二连浩特西南部艾力格庙地区,向西可延伸至蒙古托托尚—南戈壁和我国阿拉善北部地区,岩石组合为石英岩、云母石英片岩、大理岩和变质流纹岩及其凝灰岩等(内蒙古地质矿产局, 1991;周印章等,2013)。对艾力格庙群碎屑锆石年龄、火山岩锆石 U-Pb 年龄(923 Ma)和地层叠置关系的研究表明艾力格庙群是由两套不同时代和不同岩性地层组成的,艾力格庙群下段以石英岩和变质酸性火山岩及凝灰岩为主,石英岩中有大量格林威尔期(1.1~1.0 Ga)、1.6~1.4 Ga 锆石,其沉积时限为 1003~923 Ma。其中 1.6~1.4 Ga 碎屑锆石物质来源为近源的同时期花岗岩—流纹岩,而 1.1~1.0 Ga 岩浆活动在中亚造山带东部尚未发现(Wang Zhiwei et al., 2022a)。吉尔吉斯斯坦北天山也存在少量 1.1 Ga 花岗岩和英安岩—流纹岩,但它们均具有富集的 Nd—Hf 同位素组成(Kröner et al., 2013),与艾力格庙群中碎屑锆石高放射性成因 Hf 同位素组成明显不同,排除其作为源区物质的可能,因此作者提出它们很有可能来源于中亚造山带微陆块以外的源区(Wang Zhiwei et al., 2022a),但也不排除近源物质供给的可能性。

(2)新元古界。新元古代沉积记录在中亚造山带东部几个微陆块上均有分布,但大部分被显生宙花岗岩侵入及地层覆盖,出露规模有限(图 1 和 2)。

额尔古纳地块西部发育新元古界额尔古纳河群和佳疙疸组。额尔古纳河群由下部大理岩和上部变质石英砂岩及云母石英片岩等组成,碎屑岩锆石 U-Pb 定年和地层覆盖关系揭示了其沉积时代介于 738~712 Ma(Zhang Yihan et al., 2014)。佳疙疸组主要由板岩、千枚岩、结晶灰岩、炭质板岩夹变质砂岩和安山岩组成,锆石 U-Pb 年代学研究显示碎屑锆石年龄主要介于 790~990 Ma,地层的沉积作用发生在 790~757 Ma 之间(Zhao Shuo et al., 2016)。碎屑锆石年龄和 Hf 同位素组成表明两套沉积的物

质来源于区域上同时代的岩浆岩。二者均为相对稳定的大陆边缘海相沉积。

兴安地块新元古界包括地块西部的艾力格庙群上段、昌特敖包组和东北部的兴华渡口群。二连地区艾力格庙群上段以变质细碎屑岩和大理岩为主,其中的细粒绢云母石英片岩碎屑锆石年龄以 923、876 Ma 为主要峰期,1.7~1.4 Ga 为次要峰期,同时记录了 750 Ma 变质事件,兴安地块上同时期的岩浆岩为它们提供了碎屑物质,沉积时代介于 827~750 Ma(Wang Zhiwei et al., 2022a)。苏左旗北部昌特敖包组石英岩和黑云母斜长片麻岩分别给出了 1237、930 Ma 的原岩最大沉积时代,它们均在 921 Ma 黑云母二长花岗岩侵位前完成沉积(Yang Zhenning et al., 2021)。兴华渡口群以富铝系列片岩和片麻岩、斜长角闪岩、大理岩和磁铁石英岩为主,变质碎屑岩给出了大量 1.0~1.2 Ga、1.6~1.8 Ga 和 2.5~2.6 Ga 岩浆成因碎屑锆石年龄和 798 Ma、628 Ma、500 Ma 变质锆石年龄,结合 847~767 Ma 花岗质片麻岩的存在,暗示了其在 847 Ma 之前已完成沉积,后期遭受了~500 Ma 高级变质作用改造(苗来成等,2007;Zhou Jianbo et al., 2011)。兴华渡口群碎屑岩具有混合物源的特征,1.0~1.2 Ga 物质可能来源于外部块体,1.6~1.8 Ga 物质由本地块同时期花岗岩提供,而 2.5~2.6 Ga 碎屑物质可能来源于地块东侧龙江以及北侧额尔古纳地块太古宙基性岩和花岗岩。

在松嫩地块东北部沉积了新元古代东风山群亮子河组和桦皮沟组、晨明组火山—沉积建造。亮子河组由下部的磁铁石英岩、变质玄武安山岩(916 Ma)组成(Zhang Liyang et al., 2022),上部由云母石英片岩和大理岩组成,碎屑锆石年代学研究表明峰期年龄有 821 Ma、1.2~1.6 Ga、1.8 Ga 和 2.5 Ga,上部沉积时代介于 821~752 Ma(Wang Feng et al., 2014)。桦皮沟组以大理岩、云母石英片岩、石英岩等为主,碎屑锆石峰期年龄为 752 Ma、821 Ma、852 Ma、921 Ma, Wang Feng 等(2014)基于地层覆盖关系认为其于 752~560 Ma 发生沉积。晨明组以厚层石灰岩及泥岩为特征,产藻类化石,沉积时代介于新元古代晚期—早寒武世,是一套被动大陆边缘的浅海相沉积。地块南部发育了塔东群朱墩店组斜长角闪岩、斜长片麻岩、大理岩和云母石英片岩等,碎屑岩给出了 751~749 Ma、855 Ma、914 Ma 的峰期年龄和少量格林威尔期碎屑锆石(付俊彧等,2021;Wang Feng et al., 2014),基于 726 Ma 变质辉长岩的存在

(许文良等, 2019), 暗示其沉积时限为 751 ~ 726 Ma。此外, 伊春黑龙宫组和红山组中也鉴别出新元古代沉积建造, 沉积时代分别为 805 ~ 561 Ma 和 747 ~ 561 Ma (高福红等, 2016)。总体来看, 0.7 ~ 0.9 Ga、1.8 Ga 的碎屑物质主要源区物质为松嫩地块上的同时期岩浆岩, 1.2 Ga 锆石尚不清楚是否存在近源物源区或是来自外部块体, 2.5 Ga 碎屑物质可以由龙江和额尔古纳地区同时代岩浆岩提供。

在佳木斯—兴凯地块西缘, Luan Jinpeng 等 (2017b) 对变质沉积岩的研究揭示了西麻山组二云母石英片岩原岩沉积年龄可能介于 994 ~ 927 Ma, 从马家街组中识别出最大沉积年龄分别为 1151 Ma 和 927 Ma 的变质细砂岩, 其中还出现了大量 1.1 ~ 1.6 Ga 碎屑锆石, 与兴安地块西部艾力格庙群碎屑锆石的年龄和 Hf 同位素组成十分相似, 很可能也是两套不同时代的沉积岩, 鉴于区域上存在 898 ~ 891 Ma 片麻状花岗岩 (Yang Hao et al., 2017, 2018), 它们很可能在 898 Ma 之前已经完成沉积。

1.2 微陆块与周围块体的联系

中亚造山带东部前寒武纪微陆块的来源一直是研究的热点和争论的焦点。实际上, 微陆块的亲缘性是一个复杂的问题, 因为块体在后期不同阶段可能经历与来源块体明显不同的演化历史, 可能与其他块体存在相互作用或者联系。因此我们要厘清其来源, 再以演化的思维来探讨其演化过程及其与其他块体的联系。

西伯利亚克拉通 Kitoy 地体发育最古老的 3.4 Ga 酸性麻粒岩, 经历了 2.6 Ga 麻粒岩相变质作用 (Poller et al., 2005), 克拉通南部 Sharyzhalgay 隆起也出露有 3388 ~ 3311 Ma TTG 岩石, 它们具有正的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 二阶段模式年龄反映了 3.6 ~ 3.45 和 3.35 Ga 经历里两次重要的地壳增生事件 (Turkina et al., 2013)。Turkina 等 (2012) 还识别出 2662 Ma 基性和 2694 Ma 酸性麻粒岩, 二者分别经历了 1881 Ma 和 2540 Ma 高级变质作用, 同时作者报道存在 2540 Ma 花岗岩, 后期遭受了 1849 Ma 高级变质作用。麻粒岩原岩形成于古老陆块活动大陆边缘环境。Irkut 和 Kitoy 均存在同时代变质作用 (2.6 Ga) 和同碰撞花岗岩 (2.5 Ga), 表明二者在新太古代发生碰撞; 组成西伯利亚的几个老陆核 West Aldan、Daldyn 和 Sharyzhalgay 隆起从新太古代开始碰撞拼合 (2.7 ~ 2.5 Ga), 最终完成克拉通化的时间在 ~ 2.0 ~ 1.85 Ga (Turkina et al., 2012)。

塔里木克拉通上目前报道最古老的岩石是 3.7

Ga 英云闪长质片麻岩, 3.6 ~ 3.2 Ga、2.9 Ga 岩石仅有极个别报道, 克拉通南部和北部均发育 3.2 ~ 3.0 Ga 闪长岩和 TTG 岩石, 2.8 Ga 开始出现高钾花岗岩, 2.74 ~ 2.5 Ga 角闪岩 (变质辉长岩)、闪长岩、TTG 和高钾花岗岩, 2.4 ~ 2.2 Ga 高钾花岗岩及克拉通南部埃达克质花岗岩 (Ge Rongfeng et al., 2022)。塔里木在 1.93 ~ 1.8 Ga 发育广泛的角闪岩—麻粒岩相高级变质作用 (Lu Songnian et al., 2008), 同时伴生有 1.92 ~ 1.85 Ga I 型花岗岩和 1.85 ~ 1.78 Ga A 型花岗岩及基性岩墙。1.55 ~ 1.40 Ga、1.1 ~ 1.0 Ga 以及 0.93 ~ 0.84 Ga 基性—中性—酸性岩浆岩零星分布于塔里木克拉通东北缘和西南缘, 而 0.78 ~ 0.61 Ga 基性—酸性侵入岩广泛分布于克拉通内 (蔡志慧等, 2019; Zhang Chuanlin et al., 2013)。

华北克拉通发育的岩浆活动更为复杂, 包括有 3.8 ~ 3.6 Ga 奥长质石英闪长岩—奥长花岗岩, 2.8 ~ 2.7 Ga 花岗岩—绿岩带, 2.6 ~ 2.5 Ga TTG 片麻岩、镁铁质—超镁铁质岩, 2.5 Ga 同构造紫苏花岗岩、花岗岩和少量双峰式火成岩, 2.3 ~ 2.0 Ga 双峰式火山岩和板内岩浆岩, 同时也经历了复杂的高级变质作用 (3.56 Ga、3.3 ~ 3.0 Ga、2.7 ~ 2.6 Ga、2.5 Ga、1.95 ~ 1.85 Ga) (Zhao Guochun et al., 2013; 沈其韩等, 2016)。同位素研究显示华北克拉通在 2.8 ~ 2.7 Ga 经历了最重要的一期地壳增生事件。部分学者认为多个微陆块在 2.7 ~ 2.5 Ga 碰撞拼贴形成华北克拉通基底, 古元古代进入裂谷阶段, 并在 1.95 ~ 1.85 Ga 再次碰撞 (Zhai Mingguo et al., 2003, 2010, 2011)。另一种观点认为阴山和鄂尔多斯陆块、龙岗和狼林陆块分别在 1.95 Ga 和 1.90 Ga 碰撞形成西、东部陆块, 在 1.85 Ga 东西陆块最终碰撞拼合 (Santosh, 2010; Yin Changqing et al., 2011; Zhao Guochun et al., 2003, 2005, 2012, 2013; Kusky, 2011)。在 1.75 ~ 1.68 Ga 期间华北克拉通北部产出了代表伸展环境的环斑花岗岩、斜长岩、纹长花岗岩等, 1.6 ~ 1.4 Ga 燕辽裂谷带沉积岩内也夹有少量凝灰岩和斑脱岩 (耿元生等, 2019), 也有报道存在 1.32 ~ 1.2 Ga 燕辽基性大火成岩省、1.32 Ga A 型花岗岩 (Zhang Shuanhong et al., 2012, 2017; Shi Yuruo et al., 2012)。另外, Peng Peng 等 (2015) 在华北克拉通上也识别出大量 925 ~ 810 Ma 基性岩墙群。

通过对比可以发现, 上述 3 个克拉通、中亚造山带东部微陆块均发育 2.5 Ga、1.8 Ga 岩浆活动。但微陆块内发育不同的岩石组合, 包括 2.5 Ga 变质基

性岩—闪长岩—花岗岩、1.8 Ga 变辉长岩—闪长岩—花岗岩,而且尚未发现 2.5 和 1.8 Ga 同构造花岗岩和高级变质作用。从弱亏损的同位素组成和中太古代二阶段模式年龄(2.8~3.1 Ga)来看,酸性岩主要是来源于更加古老地壳物质的再造,与华北克拉通北部特征基本一致(图 3a;Sun Guozheng et al., 2022)。Liu Yongjiang 等(2021)和吴新伟等(2022)也认为松嫩地块发育 2.7 Ga、2.5 Ga、2.0 Ga、1.8 Ga 岩浆活动与华北克拉通的岩浆事件及锆石 Hf 同位素组成相似,表明其与华北克拉通经历了相似的演化历史。另外,中亚造山带东部微陆块(包括额尔古纳、兴安、松嫩)发育相似的 2.5~1.8 Ga 基底岩石且其间缺少古老的蛇绿岩,它们可能构成了一个联合古陆。华北克拉通北缘白乃庙岛弧带也发育 2.5~1.8 Ga 和 1.4~1.3 Ga 岩浆活动,同样显示出高放射性成因的锆石 Hf 同位素组成特征(郭云鹏等,2018;钱程等,2018;Li Changhai et al., 2021; Ma Haitao et al., 2022; Du Jiyu et al., 2023)。基于上述结果,本文认为中亚造山带东部微陆块陆核至少在 2.7 Ga 前已经形成,可能从华北克拉通北部裂解出去,并在其周缘演化,未参与克拉通化过程,而在 2.5 和 1.8 Ga 可能经历了洋陆俯冲作用,诱发了古老岩石圈地幔和陆壳的部分熔融。不同的是,2.5 Ga 陆壳相对较厚,岩浆温度较低(图 3),可能与太古宙不同的板块构造样式(厚的洋壳俯冲于厚陆壳之下)有关(Ge Rongfeng et al., 2022)。

古元古代末期(1.7~1.6 Ga)华北克拉通进入区域伸展阶段形成大量 AMCG 组合,而中亚造山带东部微陆块相对缺乏同期的岩浆记录。1.4~1.3 Ga 期间,白乃庙岛弧带至华北克拉通北部均发育 A 型花岗岩(Shi Yuruo et al., 2012; Zhang Shuanhong et al., 2012; Li Changhai et al., 2021),同时华北北部还发育燕辽基性大火成岩省(张拴宏等,2022; Zhang Shuanhong et al., 2017)。从空间上来看,从克拉通北部—白乃庙岛弧带,1.4~1.3 Ga 花岗岩表现从富集到亏损的同位素组成变化,这可能意味着经历过横向增生作用,燕辽基性岩普遍具有 Nb、Ta 和 Ti 亏损的特征可能也证明了这一推论,这一时期还发育了白云鄂博裂谷带,本文认为华北克拉通北部及周缘微陆块可能整体处于俯冲后撤的伸展环境下。兴安地块西部也发育较大面积的 1.4~1.3 Ga A 型花岗岩—流纹岩,也以高放射性成因锆石 Hf 同位素为特征,同时存在一套以近源物源为主的碎屑岩和碳酸盐岩沉积,也显示出与弧后盆地类似的动

力学过程有关(Yang Zhenning et al., 2021; Wang Zhiwei et al., 2022a)。

尽管华北克拉通和中亚造山带东部尚未发现 1.1~0.98 Ga 岩浆和变质作用,但大量 1.0~0.8 Ga 碎屑岩和碳酸盐岩广泛发育于华北克拉通北部—东部及兴安地块西部,包括华北克拉通白云鄂博群呼吉尔图组、狼山群、土门群,兴安地块艾力格庙群(Hu Bo et al., 2012; Hu Jianmin et al., 2014; Liu Chaohui et al., 2017)。实际上,相似的沉积岩在中天山—伊犁地块、西伯利亚克拉通南缘均有分布(Gladkochub et al., 2006; Huang Zongying et al., 2019; Huang Hu et al., 2019)。上述沉积地层中均含有大量 1.1~0.98 Ga 碎屑锆石,很可能是外源成因的,暗示了这些克拉通及微陆块虽然没有直接参与格林威尔造山运动,但是接受了与之相关的沉积物质。在 0.95~0.85 Ga 期间,华北克拉通相对稳定,但在中亚造山带东部微陆块上发育了大量的岩浆活动,954 Ma 过铝质花岗岩可能是松嫩地块与佳木斯地块陆—陆碰撞过程的产物,而微陆块上 0.94~0.85 Ga 大面积钙碱性岩浆活动可能与俯冲作用相关(Tang Jie et al., 2013; Zhang Liyang et al., 2022; Luan Jinpeng et al., 2017a, 2019; Liu Huichuan et al., 2020)。这显示出新元古代中亚造山带东部微陆块与华北克拉通北部经历了明显不同的构造演化过程。

2 微陆块与 Columbia 超大陆演化的联系

在大多数超大陆重建模型中,2.0~1.8 Ga 和 1.7~1.2 Ga 分别经历了 Columbia 超大陆的碰撞聚合和伸展—裂解过程,而 1.10~0.98 Ga、0.9~0.55 Ga 分别对应了 Rodinia 超大陆碰撞聚合与伸展—裂解阶段。Columbia 超大陆的聚合导致了全球大多数克拉通内发育大规模的高级变质作用,随后,超大陆内部发育 1.6~1.3 Ga 的裂谷带和非造山岩浆作用,而超大陆外部则以发育长周期大陆弧和增生造山带为特征(Rogers et al., 2002; Zhao Guochun et al., 2004; Pisarevsky et al., 2014; Meert et al., 2017)。Rodinia 聚合经历了 1.1 Ga 的碰撞前板内岩浆作用,1090~980 Ma 的高级变质作用和沿格林威尔造山带的变形作用,随后的碰撞后伸展及周缘俯冲过程(Hynes et al., 2010; Cawood et al., 2016),825~800 Ma 超级地幔柱可能触发了 Rodinia 北部的初始伸展和裂解,整个过程具有穿时性,可延

伸至~550 Ma (Li Zhengxiang et al., 2008; Cawood et al., 2016)。

前人大量的研究认为中亚造山带内微陆块产出有 1.8~1.3 Ga 岩浆活动,可能是 Columbia 超大陆演化的结果(孙立新等,2013; Han Jie et al., 2017; He Zhenyu et al., 2018)。由于缺乏可靠的古地磁数据,很难确定微陆块在超大陆中的精确位置,但以下 3 个方面的相似之处为我们探讨中亚造山带东部微陆块在 Columbia 超大陆中的位置及演化过程提供了可能,①华北、西伯利亚和劳伦在 1800~700 Ma 期间有相似的古地磁极移曲线,②兴安地块西部发育与劳伦南部可类比的中元古代 A 型花岗岩—流纹岩组合及同位素变化,③兴安地块 1.8~1.3 Ga 基底岩石时空分布、长周期的同位素亏损与劳伦南部可对比。

第一,兴安地块东北部 1872~1847 Ma I 型花岗岩岩浆结晶温度介于 802~884℃,产出与俯冲相关的地壳加厚环境(Sr/Y 计算的地壳厚度平均值为 52 km),是中太古代(2.8~3.0 Ga)古老地壳物质再造的产物(图 3;孙立新等,2013; Li Gongyu et al., 2019)。松嫩地块西部和南部发育 1873~1808 Ma 变辉长岩—闪长岩—花岗岩、1808 Ma A 型二长花岗岩,后者岩浆起源于新—中太古代古老地壳物质的部分熔融(图 3a; Wang Ying et al., 2006; Pei Fuping et al., 2007; 张超等,2018),其相对高的岩浆结晶温度(893~952℃)和较低的地壳厚度(32~29 km)与伸展背景相吻合(图 3)。它们并未经历 1.85 Ga 高级变质作用,大量超大陆重建模型显示 Columbia 超大陆周缘在 1.8~1.3 Ga 期间经历了长周期的洋陆俯冲作用,因此本文认为中亚造山带东部微陆块内 1.8 Ga 岩浆作用很可能是超大陆周缘俯冲带作用于古老的微陆块之下的产物,1.87~1.85 Ga 以地壳挤压增厚为特征,与超大陆聚合过程一致,而 1.80 Ga 伸展的动力学机制则可能与俯冲后撤有关,其与超大陆内部块体陆陆碰撞后伸展过程共同促进了 Columbia 超大陆的伸展(图 4a)。

第二,兴安地块基底岩石的时空分布特征(东老西新)、1.4 Ga A 型花岗岩—流纹岩组合及锆石 Hf 同位素的空间变化与劳伦南部基底时空分布(北老南新)、同时期的 Granite—Rhyolite Province 岩石组合及同位素空间变异具有很好的一致性(图 4b; Van Schmus et al., 1996; Petersson et al., 2015; Wang Zhiwei et al., 2022a)。首先,从基底岩石时空分布来看,兴安地块东部出露有 1.8~1.7 Ga 花岗

质岩石,与之相邻的额尔古纳和松嫩还发育了 2.5 Ga 基性—中性和酸性侵入岩,因此整体显示出东老西新的时空分布格局(图 1b)。劳伦古陆南部从北向南分布有 Penokean Province(1.9~1.8 Ga 变质岩浆和沉积岩)、Yavapai Province(1.8~1.7 Ga 花岗岩)、Mazatzal Province(1.7~1.6 Ga 大陆弧岩浆岩)、Granite—Rhyolite Province(1.5~1.3 Ga A 型花岗岩和流纹岩)(Van Schmus et al., 1996; Petersson et al., 2015)。其次,兴安地块西部苏左旗—阿巴嘎旗和二连浩特地区存在 1516 Ma 二长花岗岩、1450 Ma A 型正长花岗岩、1399~1360 Ma A 型花岗岩以及 1385 Ma 变质流纹岩,它们共同构成了一套 A 型花岗岩—流纹岩组合,缺乏捕获锆石可能与其较高的岩浆结晶温度(810~939℃)有关,同时它们均具有高放射性成因锆石 Hf 同位素组成(图 3),而且锆石 Hf 同位素显示出从东(阿巴嘎, T_{DM2} 峰期为 1957 Ma)往西(苏左旗—二连, T_{DM2} 峰期为 1582 Ma)更加亏损的趋势(孙立新等,2018, 2020; Wang Zhiwei et al., 2022a, b)。劳伦南部 1.5~1.3 Ga A 型花岗岩和流纹岩同样以缺少捕获锆石和较高的形成温度(高于 800℃)为特征,另外,在 Granite—Rhyolite Province 内存在一条“Nd—Hf 同位素线”,北侧地壳物质更加古老 Nd $T_{DM} > 1.5$ Ga,南侧岩石 Nd $T_{DM} < 1.5$ Ga(图 4b; Van Schmus et al., 1996; Petersson et al., 2015)。此外,类似的岩石组合和同位素变化在波罗的克拉通西南 Fennoscandia、中天山地块均有出现(Roberts et al., 2015; He Zhenyu et al., 2018),在华北克拉通北部及白乃庙岛弧带同样记录了~1.4 Ga 钙碱性岩浆活动(Shi Yuruo et al., 2012; Zhang Shuanhong et al., 2012; Li Changhai et al., 2021; Ma Haitao et al., 2022)。在中天山地块 1.4 Ga 花岗岩的锆石 Hf T_{DM2} 为 1.95~1.55 Ga,而其南侧北山造山带的花岗闪长岩锆石 Hf T_{DM2} 较年轻(1.72~1.50 Ga),前人基于岩浆岩的对比研究提出中天山地块与波罗的克拉通西南 Fennoscandia 具有构造亲缘性(He Zhenyu et al., 2015, 2018)。这些中元古代岩浆活动的产生及其同位素的空间变化可能与~1.4 Ga 期间 Columbia 超大陆周缘俯冲有关(Bickford et al., 2015; Roberts et al., 2015; He Zhenyu et al., 2018),是俯冲后撤伸展机制下的产物,这可以得到兴安地块及白乃庙岛弧带 1.4 Ga 相对较薄的地壳厚度(31~29 km)的支持(图 3)。同时,位于 Columbia 超大陆内部的劳伦、波罗的、澳大利亚、亚马逊、西非、西伯利亚和

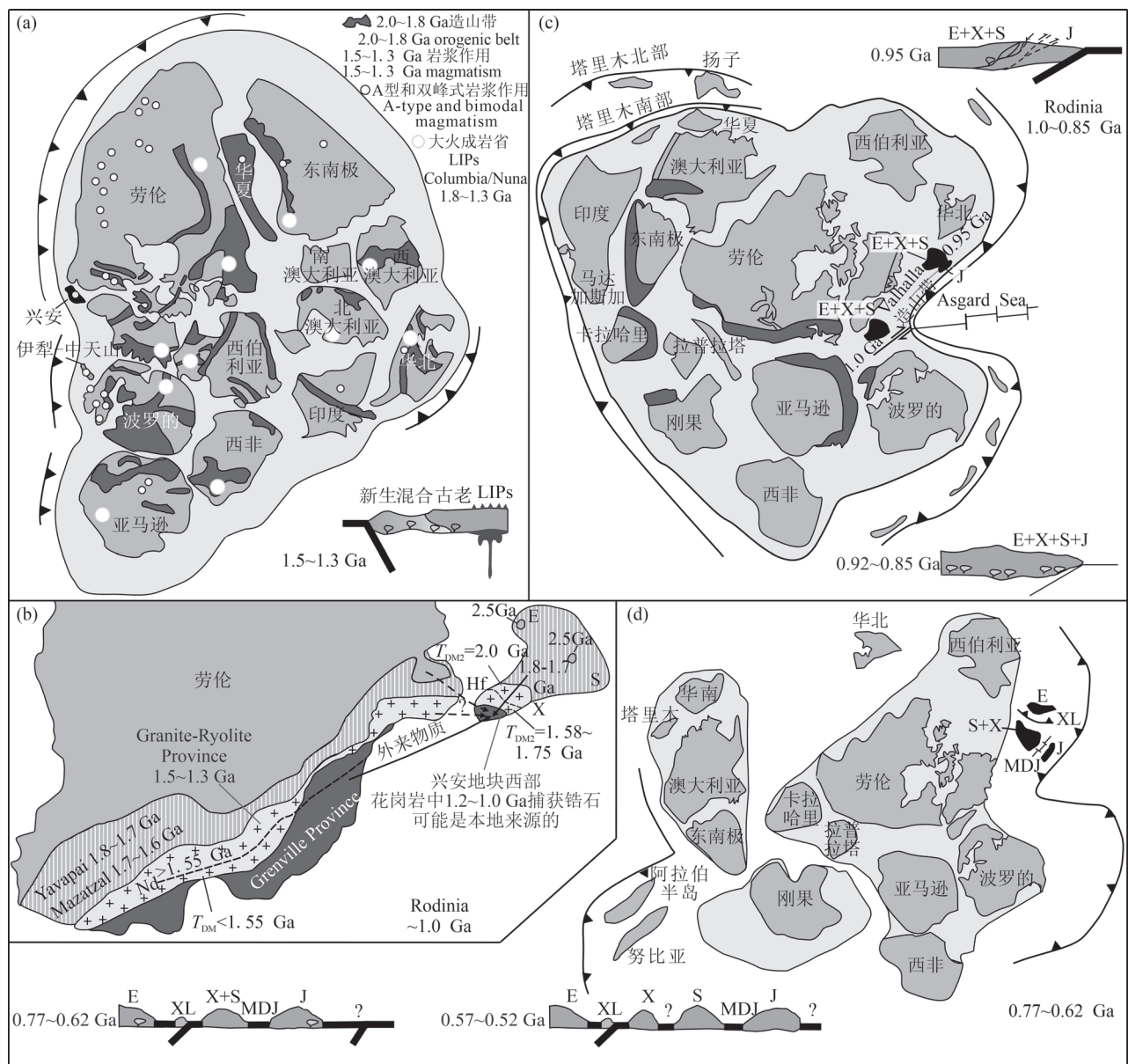


图 4 元古宙中亚造山带东部微陆块在 Columbia 和 Rodinia 超大陆演化中的位置重建
(据 Zhang Liyang et al., 2022 和 Wang Zhiwei et al., 2022a 修改)

Fig. 4 Reconstruction of micro-continents within eastern Central Asian Orogenic Belt in Columbia and Rodinia supercontinent cycle during Proterozoic (modified after Zhang Liyang et al., 2022; Wang Zhiwei et al., 2022a)

E—额尔古纳地块; X—兴安地块; S—松嫩地块; J—佳木斯—兴凯地块; MDJ—古牡丹江洋; XL—古新林洋

E—Erguna Block; X—Xing'an Block; S—Songliao Block; J—Jiamusi—Khanka Block;

MDJ—Paleo-Mudanjang Ocean Block; XL—Paleo-Xinlin Ocean Block

北形成了广范的同时期板内大火成岩省 (LIPs, 图 4a; Ernst et al., 2008; Zhang Shuanhong et al., 2017)。俯冲后撤和陆下地幔上涌共同促进了 Columbia 超大陆的伸展和裂解。综上, 作者支持前人提出的中亚造山带南缘和东部微陆块在 1.4~1.3 Ga 位于 Columbia 超大陆边缘, 中天山地块紧邻波

罗的, 而兴安地块西部显示出与劳伦古陆的亲缘性 (图 4a; Wang Zhiwei et al., 2022a, b)。

另一方面, 碎屑锆石 Hf 同位素随时间演化、与岩浆结晶温度和深度相关的地化指标的系统变化, 也揭示出了 1.7~1.2 Ga 地壳厚度稳定, 地壳长期显著增生, 与长时期的俯冲作用有关。例如, 兴安地

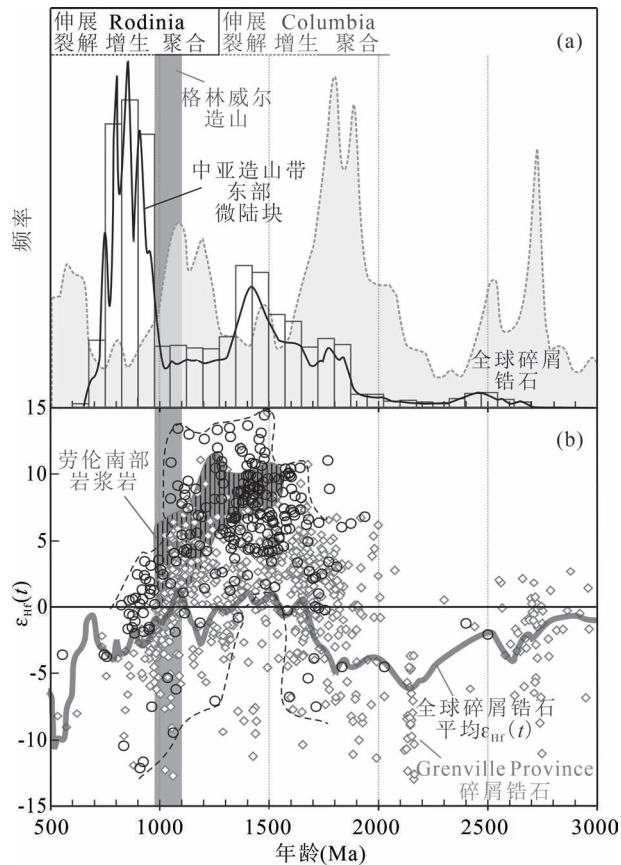


图5 中亚造山带东部微陆块中—新元古代沉积岩碎屑锆石年龄频谱图和锆石 Hf 同位素组成及其与全球碎屑锆石和劳伦南部岩浆及碎屑锆石对比(据 Wang Zhiwei et al., 2022a 修改;微陆块碎屑锆石年龄数据来自苗来成等 2007;高福红等,2016;Zhang Yihan et al., 2014; Wang Feng et al., 2014; Zhao Shuo et al., 2016; Luan Jinpeng et al., 2017b; Yang Zhenning et al., 2021; Wang Zhiwei et al., 2022a;全球碎屑锆石和劳伦南部岩浆和碎屑锆石分别来自 Cawood and Hawkesworth, 2014; Petersson et al., 2015; Spencer et al., 2015, 2019)

Fig. 5 Detrital zircon ages plots (a), Hf isotopic compositions (b) of Meso—Neoproterozoic sedimentary rocks in micro-continents within eastern Central Asian Orogenic Belt (data from Miao Laicheng et al., 2007#; Gao Fuhong et al., 2016& Zhang Yihan et al., 2014; Wang Feng et al., 2014; Zhao Shuo et al., 2016; Luan Jinpeng et al., 2017b; Yang Zhenning et al., 2021; Wang Zhiwei et al., 2022a), and their comparison with global detrital zircons, magmatic and detrital zircons in the southern Laurentian (data from Cawood and Hawkesworth, 2014; Petersson et al., 2015; Spencer et al., 2015, 2019)

(Modified after Wang Zhiwei et al., 2022a)

块约 1.7~1.2 Ga 碎屑锆石均具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,且随时代变新正值不断增大(图 5)。这一趋势与

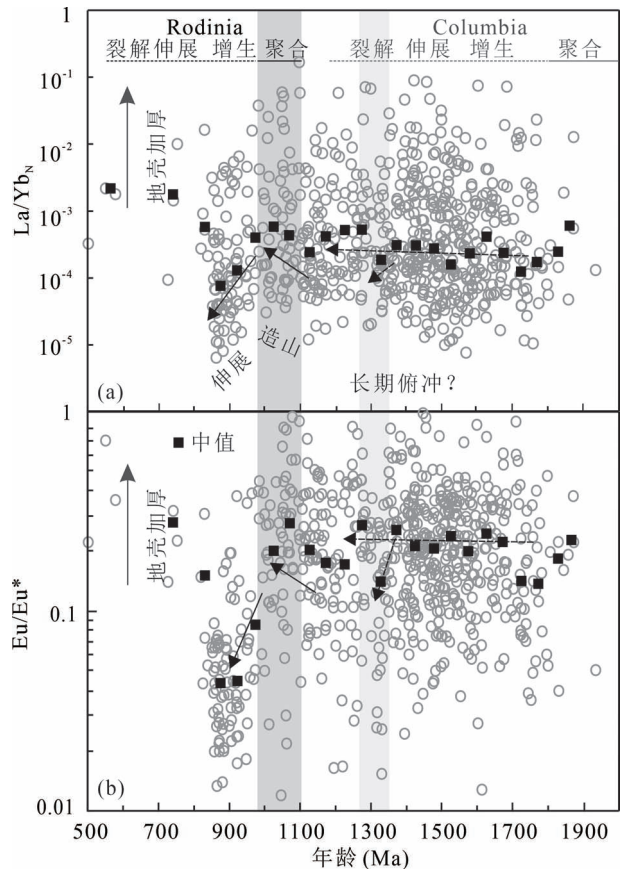


图6 兴安地块中—新元古代艾力格庙群碎屑锆石 $\text{La}/\text{Yb}_\text{N}$ (a) 和 Eu/Eu^* (b) 变化图解及其与 Columbia 和 Rodinia 超大陆演化的联系(中值以 50 Ma 为间隔计算;据 Wang Zhiwei et al., 2022a 修改)

Fig. 6 Systematic changes of $\text{La}/\text{Yb}_\text{N}$ (a) and Eu/Eu^* (b) over time of detrital zircons from the Meso—Neoproterozoic Airgin Sum Group in Xing'an Block, and their correlation with the Columbia and Rodinia supercontinent evolution (The media values are calculated with 50 Ma steps, modified after Wang Zhiwei et al., 2022a)

Grenville Province 的岩浆锆石和碎屑锆石的趋势完全吻合,并与全球碎屑锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 数据的变化部分一致(图 5;Cawood et al., 2014; Petersson et al., 2015 Spencer et al., 2019)。这表明该时期经历了长期的强烈的地壳增生过程,这与大规模裂谷活动或长期俯冲背景下亏损的幔源岩浆加入有关,这些动力学过程会导致古老下地壳和陆下岩石圈地幔的大规模置换。锆石 Ti 温度、碎屑锆石 $\text{La}/\text{Yb}_\text{N}$ 、 Eu/Eu^* 在同一时间区间的同步变化也支持了类似的动力学过程(图 6)。Y 和 HREEs 通常在高压下容易保留在石榴子石中(Lee et al., 2007),然而高压环境下斜长石的分离结晶被抑制,不消耗熔体中 Eu,

氧化作用也可以增强锆石中 Eu 的分配 (Green, 1982; Trail et al., 2012), 因此, 锆石中 $\text{La}/\text{Yb}_\text{N}$ 、 Eu/Eu^* 的增加可以作为地壳增厚的指标 (Tang Ming et al., 2021)。兴安地块西部 1.7~1.2 Ga 碎屑锆石整体表现出较高的 $\text{La}/\text{Yb}_\text{N}$ 、 Eu/Eu^* 值和相对高的锆石 Ti 温度, 暗示了该时期地壳厚度较大且基本恒定, 可能记录了 Columbia 超大陆周缘的长期俯冲作用, 但 1.35~1.27 Ga 期间出现相反的变化趋势 (图 6), 与强烈的地壳减薄相关。这也可以得到沉积岩研究的支持, Yang Zhenning 等 (2021) 发现苏左旗宝音图群 1405~1392 Ma 硅质碎屑岩碎屑锆石累计分布曲线显示出汇聚型盆地沉积的特征, 物源主要来自近源同时期花岗质岩石。

3 微陆块与 Rodinia 超大陆演化的联系

在 Rodinia 超大陆汇聚阶段, 劳伦和波罗的古陆与亚马逊古陆在 1090~980 Ma 碰撞拼贴, 形成了格林威尔造山带, 代表了 Rodinia 超大陆的最终聚合, 980~820 Ma 在超大陆周缘多个块体上发生了大洋板块俯冲作用, 包括劳伦古陆东北缘 (Valhalla 造山带), 西伯利亚南缘、东非、塔里木北缘和扬子西缘等 (Gladkochub et al., 2006; Cawood et al., 2010, 2016; Murphy et al., 2013; Ge Rongfeng et al., 2016)。Rodinia 超大陆从 820 Ma 开始大规模伸展, 在 750 Ma 左右开始裂解, 可以一直持续到 550 Ma, 超级地幔柱的出现可能主导了裂解过程, 不可忽视的是俯冲回撤的拖拽力也起到了重要作用 (Li Zhengxiang et al., 2008; 李献华, 2012; 李献华等, 2021; Cawood et al., 2016)。

中亚造山带东部微陆块与蒙古中部 Baydrag 地块前寒武纪基底组成主体一致 (Demoux et al., 2009a, b), 古地磁研究显示 Baydrag 地块 805~770 Ma 可能位于 $47 \pm 14^\circ \text{N}$ (Levashova et al., 2010, 2011), 古纬度和地质记录与塔里木、华北和华南相似, 位于 Rodinia 超大陆北部。大量的研究显示, 中亚造山带东部发育了 Rodinia 超大陆聚合—伸展裂解阶段的沉积记录和变质锆石记录, 同时还存在与 0.95 Ga 陆陆碰撞、0.95~0.77 Ga 大陆弧、0.76~0.73 Ga 板内相关的岩浆活动, 这些地质记录是揭示中亚造山带微陆块与 Rodinia 超大陆演化联系的关键 (图 3 和图 4)。

3.1 沉积记录

首先, 笔者等已经在兴安地块上识别出可能与

格林威尔期造山作用有关的沉积序列, 以二连南部艾力格庙群为代表, 其下段的石英岩和变质酸性火山岩、上段的变质细碎屑岩和碳酸盐岩形成时代分别为 1.00~0.92 Ga 和 0.87~0.75 Ga, 二者的物源存在明显变化, 从以格林威尔期年龄主要峰期为主向缺失该事件的新元古代单一峰期转变 (Wang Zhiwei et al., 2022a)。两套变质沉积岩中 1.50~1.44 Ga、1.13~1.07 Ga 和 0.92~0.87 Ga 年龄峰值与 Columbia 和 Rodinia 超大陆旋回的时间跨度吻合较好 (图 5a; Cawood et al., 2014)。两段地层的岩石组合、碎屑锆石年龄和 Hf 同位素变化与格林威尔造山带有关同碰撞和碰撞后沉积序列相似, 而且地层下段石英岩中的锆石还存在与劳伦南缘 Grenville Province 相似的变质记录 (1.77~1.60 Ga、1.57~1.41 Ga、1.27~1.12 Ga、1.09~1.00 Ga; Hynes et al., 2010; Spencer et al., 2015, 2019; Wang Zhiwei et al., 2022a), 而中亚造山带东部普遍缺少上述变质记录和 1.1~1.0 Ga 岩浆记录, 作者认为艾力格庙群下段滨海相硅质碎屑岩可能在格林威尔造山期间沉积于劳伦古陆东南缘 Grenville Province 附近, 接受了大量元古宙变质锆石和格林威尔期碎屑锆石, 而上段缺少 1.1~1.0 Ga 锆石记录的浅海相细碎屑岩—碳酸盐岩建造可能形成于造山后阶段远离造山带的大陆边缘之上。佳木斯地块西缘也报道有类似碎屑锆石年龄组成及物源变化的沉积记录 (Luan Jinpeng et al., 2019)。另外, 兴安地块西部艾力格庙群碎屑锆石微量元素和 Hf 同位素随时代的系统性变化, 也揭示了 1.1~0.8 Ga 期间存在明显不同的两个地壳演化阶段: ① 1.10~0.98 Ga 地壳明显加厚, 伴有大量古老地壳物质重熔, 表现为随时代变新 Eu/Eu^* 、 $\text{La}/\text{Yb}_\text{N}$ 持续升高和锆石 Ti 温度降低、锆石 $\varepsilon_\text{Hf}(t)$ 值大斜率快速降低; ② 0.9~0.8 Ga 地壳持续减薄, 以古老地壳再造为主, 体现为 Eu/Eu^* 、 $\text{La}/\text{Yb}_\text{N}$ 持续降低和锆石 Ti 温度升高、锆石 $\varepsilon_\text{Hf}(t)$ 值降低 (图 6)。这些过程与 Rodinia 超大陆聚合阶段格林威尔造山 (1080~980 Ma) 及随后的垮塌伸展过程基本吻合 (图 6; Wang Zhiwei et al., 2022a)。此外, 兴安地块西部苏左旗地区昌特敦包组黑云母斜长片麻岩 (沉积时代为 930~921 Ma) 峰期年龄相对单一, 主要峰期为 930 Ma, 次要峰期为 1062 Ma, 碎屑锆石年龄累计曲线与俯冲带大陆边缘盆地锆石年龄组成相似, 主要来源于由近源同时期大陆弧岩浆岩, 可能与 Rodinia 超大陆周缘俯冲作用有关 (Yang Zhenning et al.,

2021)。

其次,锆石 Hf 同位素研究显示兴安地块西部 1.2~1.0 Ga 外来锆石岩浆源区以古老地壳的再造和混合为主,而 0.9~0.8 Ga 的地壳演化主要以古元古代地壳的再造为主(图 5b),这与根据碎屑锆石 Hf—O 同位素提出的 Grenville 造山带地壳演化需要年轻地壳和至少 1.8 Ga 的古老地壳的混合相一致 (Spencer et al., 2019)。1.1~0.8 Ga 期间,古老地壳的再造也控制了 Rodinia 超大陆组成部分(如劳伦、波罗的、塔里木、华南、扬子、北天山、中天山、伊犁等块体)的地壳演化(Kröner et al., 2013; Roberts et al., 2015; Huang Zongying et al., 2019; Huang Hu et al., 2019; Spencer et al., 2019)。1.10~0.98 Ga 格林威尔碰撞造山、0.9~0.8 Ga 的碰撞后山根垮塌伸展和 Rodinia 外围古陆块边缘的俯冲增生造山作用,共同主导了持续的古老地壳物质再造(图 4c; Roberts et al., 2015; Huang Zongying et al., 2019; Huang Hu et al., 2019; Spencer et al., 2019; Wang Zhiwei et al., 2022a)。因为碰撞过程可以使古老沉积物快速输入到源区,而且可以促进先存古老地壳的部分熔融,进而产生同一后碰撞岩浆作用,如喜马拉雅造山带(Ji Weiqiang et al., 2020)。另外,在新元古代早期,一个长寿命的环 Rodinia 前进式俯冲系统可能沿劳伦东部、波罗的东部、西伯利亚南缘、南美和西非、东非、塔里木北缘、扬子西缘、伊犁和 中天山、兴安、额尔古纳等块体发育了安第斯型大陆弧,触发了大量古老下地壳的再造,同时也有少量年轻地壳物质的加入(Huang Zongying et al., 2019; Huang Hu et al., 2019; Spencer et al., 2019; Wang Zhiwei et al., 2022a; Zhang Shuanhong et al., 2022)。

基于此,我们提出了一个重建方案,即兴安地块在 1.4 Ga 可能位于 Columbia 超大陆边缘,劳伦古陆东南缘(图 4a),1.00~0.92 Ga 在 Grenville Province 东部沉积了艾力格庙群硅质岩石(图 4c)。由于 1.10~0.99 Ga 波罗的克拉通顺时针旋转,导致劳伦东南部和波罗的北部之间的 Asgard 海打开,沿劳伦古陆东南边缘的外部增生造山带(Valhalla)启动,形成了 980~920 和 840 Ma 钙碱性岩浆活动(Cawood et al., 2010, 2016),在 Valhalla 造山带附近,可能的东北向走滑断层改变了兴安、伊犁和 中天山地块原来的位置(图 4c),同时这一过程也可能终止了 Grenville 造山带碎屑的沉积作用,并导致在 0.87~0.75 Ga 内形成了艾力格庙群上段的细粒碎屑和碳

酸盐岩。

中亚造山带东部额尔古纳、松嫩地块还发育了与超大陆裂解有关的沉积记录。例如,额尔古纳地块北部 738~712 Ma 额尔古纳河群和 790~757 Ma 佳疙疸组变质碳酸盐岩和细碎屑岩沉积(Zhang Yihan et al., 2014; Zhao Shuo et al., 2016),是稳定的大陆边缘海相沉积。在松嫩地块东北部也沉积了新元古代东风山群亮子河组磁铁石英岩(916 Ma)及变质陆源碎屑岩和碳酸盐岩(821~752 Ma)、新元古代晚期—早寒武世晨明组厚层石灰岩夹泥岩,新元古代晚期桦皮沟组(752~560 Ma)大理岩、云母石英片岩、石英岩等,地块东南部发育了塔东群朱墩店组(751~726 Ma)变质碳酸盐岩和细碎屑岩沉积(Wang Feng et al., 2014)。它们均具有被动大陆边缘浅海相沉积的特征,被动大陆边缘数量增加是 Rodinia 超大陆裂解的结果(图 4d)。

3.2 岩浆记录

中元古代晚期(1.2~1.0 Ga)岩浆岩在中亚造山带内较为罕见,仅在南吉尔吉斯北天山地块发现少量~1.1 Ga 具有富集 Hf—Nd 同位素特征的花岗岩和酸性火山岩。尽管在兴安地块西部中—新元古代艾力格庙群中存在大量的 1.2~1.0 Ga 碎屑锆石,但在中亚造山带东部尚未发现切确的 1.10~0.98 Ga 岩浆活动。Wang Zhiwei 等(2022a)推测兴安地块西部的格林威尔期碎屑锆石颗粒主要来自劳伦南部的 Grenville Province。但我们并不能完全排除本地来源的可能性。

作者近年来开展的花岗岩捕获锆石及 Hf 同位素研究显示兴安地块西部可能存在 1.2~1.0 Ga 地壳物质(王志伟等, 2022; Wang Zhiwei et al., 2022b)。一方面,我们在侵入艾力格庙群的晚石炭世花岗岩(317 Ma)中发现大量元古宙捕获锆石,形成时代有 1827~1768 Ma、1556~1526 Ma、1195~1082 Ma 和 964 Ma。这些锆石年龄与艾力格庙群碎屑锆石年龄谱存在一定差异,后者主要年龄峰期为 923~871 Ma 和 1597~1003 Ma,次要峰期年龄为 1887~1661 Ma 和 2570~2029 Ma。此外,317 Ma 花岗岩中所捕获的元古宙岩浆锆石颗粒与艾力格庙群中具有较宽变质边的同时代碎屑锆石颗粒明显不同,捕获锆石均呈自形和半自形晶,不发育明显的变质边。因此,晚石炭世花岗岩中格林威尔期岩浆成因捕获锆石很可能来自兴安地块之下的结晶基底,而不是来自艾力格庙群的碎屑锆石(王志伟等, 2022)。这一结论也可以得到锡林浩特地区大量格

林威尔期岩浆成因捕获锆石存在的支持。例如,锡林浩特地区 458 Ma 花岗岩中也含有大量 1005 ~ 1199 Ma 的岩浆成因捕获锆石(葛梦春等,2011),同时该地区大面积古生代火山岩中也存在大量 1.2 ~ 1.0 Ga 的岩浆成因捕获锆石(笔者未发表资料)。另一方面,我们从二连浩特南部地区 384 Ma 和 281 Ma 花岗岩岩浆锆石中获得了 1.2 ~ 1.0 Ga 的 $Hf T_{DM2}$,表明其岩浆来源于中元古代地壳物质再造,但锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值大范围变化暗示了可能存在古老和新生地壳物质混合的可能性。花岗岩中 1.2 ~ 1.0 Ga 捕获锆石二阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})主要峰期为 1.5 Ga、次要峰期为 1.9 Ga,也揭示了古老地壳再造过程(Wang Zhiwei et al., 2022b)。同样,劳伦南部和东部同碰撞—后碰撞沉积序列中 1.2 ~ 1.0 Ga 碎屑锆石也显示出早—中元古代(峰值在 1623 ~ 1788 Ma)地壳物质再造过程,与 Grenville Province 同期火成岩的成因相一致(图 5)。

尽管中亚造山带东部目前尚未发现与格林威尔造山作用有直接联系的岩浆岩和变质岩,我们最新的研究显示松嫩地块东北部 954 Ma 正长花岗岩很可能是松嫩与佳木斯地块陆—陆碰撞后阶段沉积岩在地壳深部发生白云母脱水部分熔融的产物,这明显不同于额尔古纳地块同时期大陆弧基性下地壳部分熔融产生的 I 型花岗岩,因此我们推测松嫩地块上新元古代早期的岩浆活动可能是 Rodinia 超大陆碰撞聚合后伸展在中亚造山带东部的响应(Zhang Liyang et al., 2022)。松嫩地块基底西部—东南部(2.5 Ga、1.8 Ga)相对东北部(0.95 ~ 0.84 Ga)古老,东北部发育 0.9 Ga 年龄峰期相对单一的火山—沉积建造,与兴安地块东部古老西部年轻的基底分布和 0.9 Ga 火山—沉积层序相似。但不同的是松嫩地块尚未发现 1.4 Ga 花岗岩—流纹岩组合及与艾力格庙群类似的 1.00 ~ 0.92 Ga 变质沉积岩,这可能与它们所处的构造位置存在差异有关(图 4c; Wang Zhiwei et al., 2022a, b)。另外,松嫩地块东北部还发育有 929 ~ 927 Ma、917 ~ 911 Ma、895 Ma、841 Ma 中酸性岩。929 ~ 927 Ma 正长岩的原始岩浆可能来源于俯冲沉积物交代的富集地幔部分熔融,而 917 ~ 911 Ma 二长花岗岩和正长花岗岩具有加厚基性下地壳部分熔融成因的埃达克质岩石属性(Luan Jinpeng et al., 2017a)。895 Ma 和 841 Ma 片麻状花岗岩是元古宙地壳物质再造的结果,但后一期侵入岩具有更高的岩浆结晶温度、锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值和更低的 Sr/Y 及地壳厚度(图 3)。这些研究表明

洋壳俯冲作用可能在 929 Ma 之前已经开始,而且 Sr/Y 比值及其计算的地壳厚度从 929 Ma 到 917 Ma 持续加厚(平均厚度 40 km,最大可达 60 km 左右),地壳演化也以古老地壳再造为主(图 3; Luan Jinpeng et al., 2017a, 2019; Zhang Liyang et al., 2022)。

从空间分布来看,松嫩地块与额尔古纳地块发育相似的 0.95 ~ 0.84 Ga 酸性岩浆活动、相对较高的岩浆结晶温度、Sr/Y 及地壳厚度,而且与 0.92 Ga 兴安地块 I 型花岗岩特征基本一致(图 3; Tang Jie et al., 2013; Liu Huichuan et al., 2020; Yang Zhenning et al., 2021;),兴安地块西延部分英巴地区发育有 905 Ma 石榴子石电气石花岗岩(周印章等,2013)。它们与佳木斯地块上 953 ~ 920 Ma 和 898 ~ 891 Ma 中钾—高钾钙碱性基性—中性—酸性岩组合、相对较低的岩浆结晶温度、Sr/Y 及地壳厚度明显不同(图 3; Yang Hao et al., 2017, 2018; Sorokin et al., 2019),而且 0.95 ~ 0.89 Ga 岩浆岩还具有更加亏损的 Hf 同位素组成(图 3)。以上结果,结合额尔古纳、兴安和松嫩地块都发育古元古代结晶基底,更可能暗示了它们相对于佳木斯地块处于超大陆更加内部的位置(图 4c),松嫩地块较大的地壳厚度继承了前期碰撞造山的影响,位于超大陆边缘的佳木斯地块可能在 953 Ma 之前便受到洋壳俯冲的影响,板片脱水促进了地幔楔和下地壳的部分熔融,这一推测可以很好解释其相对低的地壳厚度和岩浆结晶温度(Zhang Liyang et al., 2022)。另外,北山南部存在 900 Ma 麻粒岩相变质作用(> 600℃和 0.6 GPa; Zong Keqing et al., 2017),它们可能都是 Rodinia 超大陆周缘俯冲作用产物的代表。

中亚造山带东部几个地块上在 880 ~ 850 Ma 之间基本都存在岩浆间歇期,从 850 Ma 开始,大量高温的钙碱性酸性岩浆岩、双峰式岩浆岩组合出现在松嫩和额尔古纳地块上,酸性岩 Sr/Y 值随时间逐渐减小,暗示了地壳厚度从 35 km 左右持续减小到 30 km 以下(图 3c),额尔古纳地块上 792 Ma 基性岩岩浆起源于俯冲交代的亏损地幔的部分熔融,同时也显示出板内成因(Tang Jie et al., 2013)。它们可能形成于俯冲带的伸展环境,这与几个地块上酸性岩岩浆随时代变新由弧岩浆岩逐渐向板内成因过渡的趋势相一致(Zhang Liyang et al., 2022)。另外,牡丹江缝合带内 777 Ma 具有 MORB 特征变质基性岩的出现表明佳木斯和松嫩地块之间牡丹江洋已经打

开(颌颌强等, 2008), 而且额尔古纳和兴安之间 697 ~ 628 Ma 已出现洋内俯冲作用, 说明新林洋盆在此之前已经打开(Gou Jun et al., 2020; Feng Zhiqiang et al., 2018)。

此外, 兴安地块西部新发现 750 Ma 变质事件, 在中亚造山带东部较为罕见, 2 粒 HREE 含量较高的 750 Ma 变质锆石具有较高的 Ti 温度(756 ~ 765℃), 未形成典型的高压变质矿物, 可能暗示了高 T/P 变质作用的存在(Wang Zhiwei et al., 2022a)。这一事件伴随着锡林郭勒杂岩中 740 Ma 元辉长岩的形成(周文孝等, 2013)。因此, 我们认为 750 Ma 变质事件可能发生在伸展环境中。同样, 在相邻的额尔古纳地块形成了同时期的 A 型花岗岩(737 Ma)(Tang Jie et al., 2013)。上述事件与劳伦东部边缘裂谷相关记录基本吻合(Cawood et al., 2016)。因此, 该中亚造山带东部微陆块上 750 ~ 740 Ma 地质记录可能是 Rodinia 裂解的产物。

基于以上研究, 我们可以建立一个可能的东北地块群参与 Rodinia 超大陆演化的重建模型。东北地块群可能没有直接参与格林威尔造山, 但相对位于内部的兴安地块接受了与造山有关的沉积, 超大陆周缘前进式俯冲使得佳木斯地块与兴安地块在 954 Ma 碰撞拼贴, 前进式俯冲作用持续至 880 Ma 进入间歇期, 从 850 Ma 转变为后撤式俯冲, 直至 777 Ma 和 697 Ma 之前开始不断裂解分别产生古亚洲洋的两个分支: 古牡丹江洋和古新林洋。790 ~ 520 Ma 期间在额尔古纳地块北缘、松嫩地块东缘均发育被动大陆边缘沉积。

4 微陆块与地球中年期演化

地球中年期(Earth's middle age, 1.8 ~ 0.75 Ga) 介于两次大氧化事件之间, 其地质演化与古环境变化一直是全世界地质领域研究的前沿和热点问题(Holland, 2006; Lyons et al., 2014; Cawood et al., 2014)。这一地质时期传统上被称为平静的 1.0 Ga(Holland, 2006), 然而, 越来越多岩浆、变质作用和古环境研究挑战和改变了宁静期的传统观点(Zhang Kan et al., 2018; Brown et al., 2019; Canfield et al., 2021; Spencer et al., 2021)。

第一, 地球中年期经历了 Cloumbia 和 Rodinia 超大陆旋回, 发育巨量高温岩浆和变质作用。大量研究显示岩体型斜长岩在整个元古宙均大量产出(Ashwal et al., 2017), 与世界范围内大量的高 T/P 变质作用是耦合的(Harley, 2021), 而且全球将近

三分之二的超高温变质作用均发生在元古宙, 尤其是其峰期与 Cloumbia 和 Rodinia 超大陆聚合相对应(Brown et al., 2019)。此外, 巨量的 1.5 ~ 1.3 Ga 辉长岩、斜长岩、花岗岩及火山岩产出在劳伦南部、波罗的东部、东南极、亚马逊、华夏、华北、塔里木、印度、中天山、兴安等块体上, 部分学者认为是地幔上涌至稳定的 Columbia 超大陆下由于绝热效应导致大规模熔融的结果(Hoffman, 2019), 也有学者认为它们是超大陆周缘大规模俯冲作用的产物(Bickford et al., 2015; Roberts et al., 2015; Condie, 2021; Wang Zhiwei et al., 2022a, b)。

格林威尔期经历了全球大规模碰撞造山作用。在 1.1 ~ 0.9 Ga 期间, 劳伦古陆南部经历了强烈的地壳缩短、高级变质作用、S 型花岗岩侵位, 与同时期澳大利亚 Albany—Fraser、印度 Eastern Ghats、南极 Rayner、南非 Natal—Namaqua、中非 Irumide—Kibaran、亚马逊 Rondônia—Sunsas 和波罗的 Sveconorwegian 造山带共同构成了一期全球规模的碰撞造山作用, 记录了 Rodinia 超大陆的最终聚合(Cawood et al., 2016; Hoffman, 2019; Spencer et al., 2021), 而且塔里木和华南可能也参与其中(Li Zhengxiang et al., 2008)。最新的研究显示, 元古宙造山带是热、薄、海拔低的造山带, 例如格林威尔造山带地壳平均最厚至 60 km, 与喜马拉雅碰撞造山带明显不同。大量 AMCG 组合及高 T/P 变质作用的出现意味着超大陆之下存在热的岩石圈地幔, 较高的热流值决定了格林威尔造山带相对薄的地壳厚度及较低的海拔高度、陆壳侵蚀和风化速率(Brown et al., 2019; Spencer et al., 2021)。

Rodinia 超大陆周缘可能存在新元古代环形俯冲增生造山带, 主要分布在劳伦古陆东北缘(Valhalla 造山带, 1.0 ~ 0.73 Ga), 西伯利亚南缘(900 ~ 620 Ma)、波罗的东缘(700 ~ 550 Ma)、南美和西非(760 ~ 570 Ma)、东非(955 ~ 630 Ma)、塔里木北缘(830 ~ 800 Ma) 和扬子西缘(950 ~ 735 Ma)(图 4; 徐通等, 2016; Gladkochub et al., 2006; Murphy et al., 2013; Cawood et al., 2010, 2016; Ge Rongfeng et al., 2016)。另外, Rodinia 超大陆 825 ~ 700 Ma 之间存在 4 期裂解事件: 820 ~ 800 Ma、780 ~ 755 Ma、740 ~ 720 Ma 和 650 ~ 550 Ma, 在 825 ~ 800 Ma 期间可能是超级地幔柱的出现启动了 Rodinia 的裂解, 产生了大陆边缘裂谷带、放射状基性岩墙群(侵入到不同块体内) 和大火成岩省(Li Zhengxiang et al., 2008)。澳大利亚和劳伦之间多期次(780 ~ 730、

650、580 Ma) 裂谷作用记录了原太平洋的打开和持续扩张 (Mulder et al., 2019)。760~680 Ma 岩石圈持续伸展大量陆内沉积和双峰式火山岩不整合覆盖于中元古代格林威尔造山带上, 620~550 Ma 以发育大量裂谷岩浆作用为特征, 伴随着 590~570 Ma 巨神海 (Lapetus Ocean) 的打开和古亚洲洋的持续扩张 (Cawood et al., 2016)。

第二, 全球锆石数据库低谷是地质记录形成和保存平衡的结果, 地球中年期地质记录的体量被严重低估了。数据量不断增长的全球锆石数据库, 包括花岗岩、沉积岩以及现代河流沉积物的年龄、Hf—O 同位素、微量元素和结晶温度, 显示出幕式分布特征 (图 5a), 并被广泛用于揭示重要的构造机制转换、地壳厚度、大陆生长和超大陆旋回等 (Dhuime et al., 2012; Condie, 2014; Balica et al., 2020; Tang Ming et al., 2021)。然而, 幕式分布仍存在争议的关键问题, 比如全球数据库锆石年龄低谷是代表了岩浆作用弱, 还是后期保存不好的结果? 尤其是 1.5~1.3 Ga 时期是否记录了相对较弱的岩浆活动和地壳生长速率 (Dhuime et al., 2012; Cawood et al., 2014)?

首先, 近年来, 在全球主要的克拉通、特提斯造山带及中亚造山带内一些微陆块上, 例如劳伦、波罗的、南极洲、澳大利亚、亚马逊、华夏、伊犁、中天山、兴安地块、白乃庙岛弧带等, 越来越多 1.5~1.3 Ga A 型花岗岩和双峰式火山岩以及大火成岩省、1.0~0.7 Ga 岩浆岩和沉积岩被识别出来, 尤其是大量碎屑锆石峰期年龄正好与全球数据库低谷相对应 (图 5a; 徐通等, 2016; 蔡志慧等, 2019; Goodge et al., 2008; Ramos, 2010; Smits et al., 2014; Petersson et al., 2015; Guo Liang et al., 2017; Wang Wei et al., 2016; Yao Weihua et al., 2017; Huang Zongying et al., 2019; Huang Hu et al., 2019; Pulsipher et al., 2019; Liu Huichuan et al., 2020; Yang Zhenning et al., 2021; Wang Zhiwei et al., 2022a), 进一步揭示了全球锆石数据库低谷并不是没有大量新生地壳物质产生的表征 (Hawkesworth et al., 2009), 它们是较为强烈的岩浆作用、剥蚀和沉积作用的产物, 只是在全球尺度上有相对较差的保存状态, 其体量被严重低估了 (Wang Zhiwei et al., 2022a)。

其次, 上述块体在 1.5~1.3 Ga 均发生显著的地壳生长, 而且新生地壳的体量也被低估了。这一时期产生了大量具有高放射性成因同位素组成的与伸展有关的岩浆作用 (图 4a; Li Zhengxiang et al.,

2008; Goodge et al., 2008; Smits et al., 2014; Petersson et al., 2015; Yao Weihua et al., 2017; He Zhenyu et al., 2018)。而且上述块体及华北、扬子、喜马拉雅和拉萨等块体上也存在大量 1.5~1.3 Ga 以正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为特征的碎屑锆石, 表明它们的物质来源以新生地壳物质为主, 含有少量古老和新生地壳混合物质 (Smits et al., 2014; Turner et al., 2014; Wang Wei et al., 2016; Guo Liang et al., 2017; Yao Weihua et al., 2017; Liu Chaohui et al., 2017; Huang Zongying et al., 2019; Huang Hu et al., 2019; Spencer et al., 2019)。此外, 在兴安地块西部、中天山地块、波罗的 Fennoscandia 西南部和劳伦南部的增生边缘 1.5~1.3 Ga 地壳演化普遍存在横向增生, 靠近陆内一侧有更多古老地壳物质的贡献, 而陆缘以显著的新生地壳形成为特征 (图 4a; Bickford et al., 2015; Petersson et al., 2015; Roberts et al., 2015), 古老地壳物质的加入会导致新生地壳的比例被低估。此外, 大火成岩省 (LIPs) 也记录了 1.5~1.3 Ga 的大规模地壳生长, 基性岩浆通过底侵或喷发也是地幔来源物质加入地壳的重要过程, 是制约陆壳和洋壳生长的关键。在劳伦、波罗的、澳大利亚、南极洲、西伯利亚、西非和华北发现了一些 1.5~1.3 Ga 的 LIPs, 通常与地幔柱、裂谷有关 (图 4a; Ernst et al., 2008; Zhang Shuanhong et al., 2017), 这意味着这些块体记录了 ~1.5~1.3 Ga 陆壳大规模垂向增生。

上述研究表明, 地球中年期存在一定规模的陆—陆碰撞、超大陆周缘长期俯冲、伸展和裂解作用, 产生了大量岩浆、变质和沉积记录, 而且大量新的 1.5~1.3 Ga 和 1.0~0.7 Ga “低谷期” 地质记录被不断发掘出来, 这就意味着地球中年期并不是前人认为的宁静时期。

5 总结与展望

前人的研究启示我们, 全球数据库可能不适合用于非全球性地质演化过程的示踪, 这也是一些研究者发现全球锆石数据库微量元素并不能很好地示踪超大陆聚合过程的原因。如果要用大量数据来揭示超大陆的演化过程, 我们应该重视与超大陆演化过程直接相关的区域和地质记录, 如与 Rodinia 聚合有关的同造山期和造山后的岩浆、变质和沉积记录。此外, 我们还应考虑是否有古老地壳物质加入到年轻地壳生长过程中, 这一过程很容易被忽视, 并导致低估了新生地壳的比例, 因此要仔细评估 Nd—

Hf 模式年龄的意义。

纵观前人对 Cloumbia 和 Rodinia 超大陆的研究,全球主要克拉通的岩浆、沉积和变质记录以及古地磁证据为超大陆重建提供了关键的制约,但同时不可忽视的是超大陆裂解会产生大量微陆块和地体,环超大陆的巨型俯冲带主体作用于超大陆边缘的小块体之上,因此它们也是超大陆重建的关键一环,中亚造山带内的前寒武纪微陆块将为超大陆在北亚的演化提供重要制约。尽管中亚造山带内的微陆块和全球其他古老块体边缘的微陆块或者地体一样,保存并不完整且受后期改造较为强烈,缺少可靠的古地磁数据支持,但越来越多新的岩浆、沉积、变质记录被识别出来,综合多块体地质记录的时空分布,也能为超大陆周缘俯冲增生和伸展裂解提供相对可靠的地质证据。

理解地球内部圈层之间的相互作用,探索地球深部和表层过程是地球深部过程与动力学领域的重要研究内容,其中一个重要的研究方向是大陆聚合和裂解过程、动力学机制及其资源环境效应。首先,中亚造山带东部微陆块在 Rodinia 聚合阶段是否直接参与格林威尔造山运动尚缺少格林威尔期高级变质作用和岩浆活动的精确限定。前期的工作显示可能存在上述地质事件,未来还需要寻找新的地质记录深入研究,而且微陆块参与超大陆聚合是否与自上而下的环形俯冲的动力学机制(俯冲速率增加或初始俯冲)有关仍不清楚。其次,超大陆裂解的主要动力有俯冲后撤(自上而下)和地幔柱(自下而上),中亚造山带东部新元古代基性岩出露和研究程度有限,目前的研究提出俯冲后撤促进了各陆块的伸展及裂解,但是否有地幔柱的作用还有待进一步研究。另一方面,在中亚造山带东部超大陆演化的表层地质过程响应及其资源与环境效应研究十分匮乏,例如,超大陆碰撞拼合和裂解均会导致海平面上升,而超大陆稳定存在期间保持低的海平面和高的陆域,中亚造山带东部新元古代海平面如何变化?地球中年期不同时期以低的大气氧含量为特征?是否存在增氧事件?是否存在冰碛岩、大火成岩省及地表隆升?与古生物如何协同演化?是否存在与超大陆演化有关的大型矿床?这些都是需要未来系统的工作去探讨的重要科学问题!

致谢: 2022 年是“中国地质学会成立 100 周年”和“《地质学报》(中、英文版)创刊 100 周年”,有幸受到《地质论评》编辑部的邀请撰写了该文章,祝愿中国地质学会和《地质学报》(中、英文版)在

新的一百年里再创辉煌,祝愿《地质论评》发展越来越好,更上一层楼。

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 蔡志慧, 马绪宣, 何碧竹. 2019. 中天山、伊犁及塔里木地块开始参与 Rodinia 超大陆聚合过程早于新元古代. 地质学报, 93(10): 2426~2445.
- 付俊彧, 孙巍, 杨帆, 那福超, 葛锦涛, 钟辉. 2021. 吉林省张广才岭塔东岩群年代学: Rodinia 超大陆裂解的响应. 地质学报, 95(8): 2380~2395.
- 高福红, 王磊, 许文良, 王枫. 2016. 小兴安岭“晚古生代”地层的时代与物源: 地质与碎屑锆石 U-Pb 年代学证据. 吉林大学学报(地球科学版), 46(2): 469~481.
- 葛梦春, 周文孝, 于洋, 孙俊俊, 鲍建泉, 王世海. 2011. 内蒙古锡林郭勒杂岩解体及表壳岩系年代确定. 地学前缘, 18(5): 182~195.
- 耿元生, 旷红伟, 杜利林, 柳永清, 赵太平. 2019. 从哥伦比亚超大陆裂解事件论古/中元古代的界限. 岩石学报, 35(8): 2299~2324.
- 郭云鹏, 刘建明, 曾庆栋, 高帅, 王路明. 2018. 华北克拉通北缘少郎河地区约 2.5 Ga 的二长花岗岩及地质意义. 地学前缘, 25(4): 11~22.
- 李三忠, 索艳慧, 刘博, 刘永江, 李玺瑶, 赵淑娟, 朱俊江, 王光增, 张国伟. 2018. 微板块构造理论: 全球洋内与陆缘微地块研究的启示. 地学前缘, 25(5): 324~356.
- 李双林, 欧阳自远. 1998. 兴蒙造山带及邻区的构造格局与构造演化. 海洋地质与第四纪地质, 1998(3): 46~55.
- 李献华, 李武显, 何斌. 2012. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合—裂解—观察、解释与检验. 矿物岩石地球化学通报, 31(6): 543~559.
- 李献华. 2021. 超大陆裂解的主要驱动力—地幔柱或深俯冲? 地质学报, 95(1): 20~31.
- 陆松年. 1998. 新元古时期 Rodinia 超大陆研究进展述评. 地质论评, 44(5): 489~495.
- 陆松年, 杨春亮, 李怀坤, 陈志宏. 2002. 华北古大陆与哥伦比亚超大陆. 地学前缘, 2002(4): 225~233.
- 苗来成, 刘敦一, 张福勳, 范蔚茗, 石玉茗, 颀颀强. 2007. 大兴安岭韩家园子和新林地区兴华渡口群和扎兰屯群锆石 SHRIMP U-Pb 年龄. 科学通报, 52(5): 591~601.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志. 北京: 地质出版社: 1~350.
- 钱程, 陈会军, 陆露, 庞雪娇, 秦涛, 汪岩. 2018. 黑龙江省龙江地区新太古代花岗岩的发现. 地球学报, 39(1): 27~36.
- 邵军, 李永飞, 周永恒, 王宏博, 张颀. 2015. 中国东北额尔古纳地块新太古代岩浆事件—钻孔片麻状二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS 测定证据. 吉林大学学报(地球科学版), 45(2): 364~373.
- 沈其韩, 耿元生, 宋会侠. 2016. 华北克拉通的组成及其变质演化. 地球学报, 37(4): 387~406.
- 孙立新, 任邦方, 赵凤清, 谷永昌, 李艳峰, 刘卉. 2013. 内蒙古锡林浩特地块中元古代花岗岩片麻岩的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征. 地质通报, 32: 327~340.
- 孙立新, 任邦方, 王树庆, 许新英, 张云. 2018. 内蒙古苏尼特左旗中元古代片麻状花岗岩的成因及大地构造意义. 地质学报, 92

- (11): 2167~2189.
- 孙立新, 张云, 李艳锋, 许凡, 任邦方. 2020. 内蒙古阿巴嘎旗中元古代片麻状花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及大地构造意义. 岩石学报, 36(3): 781~798.
- 王少轶, 刘宝山. 2014. 伊春东风经营所新元古代花岗岩质片麻岩 U-Pb 年代学和地球化学特征. 世界地质, 33(4): 780~786.
- 王志伟, 彭佳, 于静文, 朱泰昌, 张焱杰, 田英杰, 徐备, 史金田. 2022. 兴安地块西部晚石炭世花岗岩中—新元古代捕获锆石: 超大陆演化的记录. 地质通报, 41(2~3): 486~497.
- 吴新伟, 张超, 邵军, 郭威, 李林川, 张广宇, 刘宝山, 宋万兵. 2022. 龙江—乌兰浩特地区新太古代—古元古代岩浆事件: 对松嫩地块西缘前寒武纪地质体属性的制约. 岩石学报, 38(9): 2811~2828.
- 顾颜强, 张福勤, 苗来成, 陈福坤, 刘敦一. 2008. 东北牡丹江地区“黑龙江群”中斜长角闪岩与花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质学意义. 岩石学报, 24(6): 1237~1250.
- 徐备, 赵盼, 鲍庆中, 周永恒, 王炎阳, 罗志文. 2014. 兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探. 岩石学报, 30(7): 1841~1857.
- 徐通, 裴先治, 刘成军, 陈有炘, 李瑞保, 李佐臣, 裴磊. 2016. 南秦岭勉略构造带张儿沟新元古代变安山岩地球化学特征及锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄—Rodinia 超大陆聚合事件的记录. 地质论评, 62(2): 434~450.
- 许文良, 孙晨阳, 唐杰, 柴金鹏, 王枫. 2019. 兴蒙造山带的基底属性与构造演化过程. 地球科学, 44(5): 1620~1646.
- 张超, 吴新伟, 刘正宏, 张渝金, 郭威, 权京玉. 2018. 松嫩地块西缘前寒武岩浆事件—来自龙江地区古元古代花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学证据. 岩石学报, 34(10): 3137~3152.
- 张控宏, 赵越, 裴军令, 王宏宇, 胡国辉, 张琪琪, 蔡瑜杭, 孔令昊, 王森, 王开. 2022. 大火成岩省及其在古大陆重建及裂解研究中的应用. 地质论评, 68(5): 1634~1652.
- 赵国春, 韩以贵, 李建华, 姚金龙, 刘潜, 张东海, 王潮, 唐卿, 张健, 尹常青, 张国伟. 2022. 超大陆聚散的环境效应. 地质学报, 96(9): 3120~3127.
- 周文孝, 葛梦春. 2013. 内蒙古锡林浩特地区中元古代锡林浩特岩群的厘定及其意义. 地球科学—中国地质大学学报, 38(4): 715~724.
- 周印章, 韩宝福, 徐钊, 任荣, 苏犁. 2013. 中蒙边界英巴地区元古宙杂岩的时代及其对南戈壁微陆块分布范围的限定. 地质通报, 32(2~3): 318~326.
- Ashwal L D, Bybee G M, 2017. Crustal evolution and the temporality of anorthosites. *Earth-Science Reviews*, 173: 307~330.
- Balica C, Ducea M N, Gehrels G E, Kirk J, Roban R D, Luffi P, Chapman J B, Triantafyllou A, Guo Jingliang, Stoica A M, Ruiz J, Balintoni I, Profeta L, Hoffman D, Petrescu L. 2020. A zircon petrochronologic view on granitoids and continental evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 531: 116005.
- Bickford M E, Van Schmus W R, Karlstrom K E, Mueller P A, Kamenov G D. 2015. Mesoproterozoic—trans-Laurentian magmatism: a synthesis of continentwide age distributions, new SIMS U-Pb ages, zircon saturation temperatures, and Hf and Nd isotopic compositions. *Precambrian Research*, 265: 286~312.
- Brown M, Johnson T. 2019. Time's arrow, time's cycle: Granulite metamorphism and geodynamics. *Mineralogical Magazine*, 83(3): 323~338.
- Cai Zhihui, Ma Xuxuan, He Bizhu. 2019&. The initial assembly of the Chinese Central Tianshan, Yili and Tarim blocks to the Rodinia supercontinent prior to the Early Neoproterozoic? *Acta Geologica Sinica*, 93(10): 2426~2445.
- Canfield D E, van Zuilen M A, Nabhan S, Bjerrum C J, Zhang Shuichang, Wang Huajian, Wang Xiaomei. 2021. Petrographic carbon in ancient sediments constrains Proterozoic Era atmospheric oxygen levels. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118: e2101544118.
- Cawood P A, Strachan R, Cutts K, Kinny P D, Hand M, Pisarevsky S. 2010. Neoproterozoic orogeny along the margin of Rodinia: Valhalla orogen, North Atlantic. *Geology*, 38: 99~102.
- Cawood P A, Hawkesworth C J. 2014. Earth's middle age. *Geology*, 42(6): 503~506.
- Cawood P A, Strachan R A, Pisarevsky S A, Gladkochub D P, Murphy J B. 2016. Linking collisional and accretionary orogens during Rodinia assembly and breakup: implications for models of supercontinent cycles. *Earth and Planetary Science Letters*, 449: 118~126.
- Condie K C. 1998. Episodic continental growth and supercontinents. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 163(1): 97~108.
- Condie K C. 2014. Growth of continental crust: a balance between preservation and recycling. *Mineralogical Magazine*, 78(3): 623~637.
- Condie K C. 2021. Revisiting the Mesoproterozoic. *Gondwana Research*, 100: 44~52.
- Demoux A, Kröner A, Badarch G T, Jian Ping, Tomurhuu D, Wingate M T D. 2009a. Zircon ages from the Baydrag Block and the Bayankhongor ophiolite zone: time constraints on late Neoproterozoic to Cambrian subduction- and accretion-related magmatism in Central Mongolia. *Journal of Geology*, 117: 377~397.
- Demoux A, Kröner A, Liu Dunyi, Badarch G. 2009b. Precambrian crystalline basement in southern Mongolia as revealed by SHRIMP zircon dating. *International Journal of Earth Sciences* 98: 1365~1380.
- Deng Fei, Macdougall J D. 1992. Proterozoic depletion of the lithosphere recorded in mantle xenoliths from Inner Mongolia. *Nature*, 360(6402): 333~336.
- Dhuime B, Hawkesworth C J, Cawood P A, Storey C D. 2012. A change in the geodynamics of continental growth 3 billion years ago. *Science*, 335: 1334~1336.
- Du Jiayu, Qian Cheng, Wu Wenbin, Zhang Yujin, Zhang Chao, Qin Tao, Ma Yongfei, You Hongxi. 2023. Discovery of ~2.5 Ga zircon U-Pb age from the diabase, Ar Horqin Banner Area, Inner Mongolia: Implications for Neoproterozoic crystalline basement of Bainaimiao Arc Belt. *China Geology*, 6: 1~2.
- Ernst R E, Wingate M T D, Buchan K L, Li Zhengxiang. 2008. Global record of 1600 ~ 700 Ma Large Igneous Provinces (LIPs): implications for the reconstruction of the proposed Nuna (Columbia) and Rodinia supercontinents. *Precambrian Research*, 160(1~2): 159~178.
- Feng Zhiqiang, Liu Yongjiang, Li Long, She Hongquan, Jiang Liwei, Du Binying, Liu Yuwei, Li Weimin, Wen Quanbo, Liang Chenyue. 2018. Subduction, accretion, and collision during the Neoproterozoic—Cambrian orogeny in the Great Xing'an Range, NE China: Insights from geochemistry and geochronology of the Ali River ophiolitic mélange and arc-type granodiorites. *Precambrian Research*, 311: 117~135.
- Fu Junyu, Sun Wei, Yang Fan, Na Fuchao, Ge Jintao, Zhong Hui. 2021&. Chronology of the Tadong rock group in Zhangguangcai Ridge, Jilin Province: response to the breakup of the Rodinia supercontinent. *Acta Geologica Sinica*, 95(8): 2380~2395.

- Gao Fuhong, Wang Lei, Xu WenLiang, Wang Feng. 2016&. Age and Provenance of the Late Paleozoic Strata in Lesser Xing'an Range: Evidence from Field Geology and Detrital Zircon U-Pb Ages. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(2): 469~481.
- Ge Mengchun, Zhou Wenxiao, Yu Yang, Sun Junjun, Bao Jianquan, Wang Shihai. 2011&. Dissolution and supracrustal rocks dating of Xilin Gol Complex, Inner Mongolia, China. *Earth Science Frontiers*, 18(5): 182~195.
- Ge Rongfeng, Zhu Wenbin, Wilde S A. 2016. Mid-Neoproterozoic (ca. 830~800 Ma) metamorphic P-T paths link Tarim to the circum-Rodinia subduction-accretion system. *Tectonics*, 35: 1465 ~ 1488.
- Ge Rongfeng, Simon A. Wilde, Zhu Wenbin, Zhou Teng, Si Yang. 2022. Formation and evolution of Archean continental crust: A thermodynamic-geochemical perspective of granitoids from the Tarim Craton NW China. *Earth-Science Reviews*, 234: 104219.
- Geng Yuansheng, Kuang Hongwei, Du Lilin, Liu Yongqing, Zhao Taiping. 2019&. On the Paleo-Mesoproterozoic boundary from the breakup event of the Columbia supercontinent. *Acta Petrologica Sinica*, 35(8): 2299~2324.
- Gladkochub D, Pisarevsky S A, Donskaya T, Natapov L M, Mazukabzov A, Stanevich A M, Sklyarov E. 2006. Siberian Craton and its evolution in terms of Rodinia hypothesis. *Episodes*, 29: 169~174.
- Goodge J W, Vervoort J D, Fanning C M, Brecke D M, Farmer G L, Williams I S, Myrow P M, DePaolo D J. 2008. A positive test of east Antarctica-Laurentia juxtaposition within the Rodinia supercontinent. *Science*, 321(5886): 235~240.
- Gou Jun, Sun Deyou, Ren Yunsheng, Liu Yongjiang, Zhang Shuyi, Fu Changliang, Wang Tianhao, Wu Pengfei, Liu Xiaoming. 2013. Petrogenesis and geodynamic setting of Neoproterozoic and Late Paleozoic magmatism in the Manzhouli-Erguna area of Inner Mongolia, China: geochronological, geochemical and Hf isotopic evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 67: 114~137.
- Gou Jun, Sun Deyou, Deng Changzhou, Feng Zhao, Tang Zhongyuan. 2020. Petrogenesis of the Neoproterozoic Xinlin ophiolite, northern Great Xing'an Range, northeastern China: implications for the evolution of the northeastern branch of the Paleo-Ocean. *Precambrian Research*, 350: 105925.
- Green T H. 1982. Anatexis of mafic crust and high pressure crystallization of andesite. In: Thorpe R S. (Ed), *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. New York: John Wiley & Sons, 465~487.
- Guo Liang, Zhang Hongfei, Harris N, Xu Wangchun, Pan Fabin. 2017. Detrital zircon U-Pb geochronology, trace-element and Hf isotope geochemistry of the metasedimentary rocks in the Eastern Himalayan syntaxis: tectonic and paleogeographic implications. *Gondwana Research*, 41(1): 207~221.
- Guo Peng, Xu Wenliang, Wang Chunguang, Wang Feng, Ge Wenchun, Sorokin A A, Wang Zhiwei. 2017. Age and evolution of the lithospheric mantle beneath the Khanka Massif: Geochemical and Re-Os isotopic evidence from Sviyagino mantle xenoliths. *Lithos*, 282~283: 326~338.
- Guo Yunpeng, Liu Jianming, Zeng Qingdong, Gao Shuai, Wang Luming. 2018&. The ~2.5 Ga monzogranite in the Shaolange area of the northern margin of the North China Craton and its geological significance. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(4): 11~22.
- Han Jie, Zhou Jianbo, Li Long, Song Mingchun, 2017. Mesoproterozoic (~1.4Ga) A-type gneissic granites in the Xilinhot terrane, NE China: first evidence for the break-up of Columbia in the eastern CAOB. *Precambrian Research*, 296: 20~38.
- Han Shijiong, Yang Yanchen, Bo Junwei, Zhang Guobin, Khomich Vadim G, Huang Yongwei, Yang Yunbao, Wang Xueyang. 2019. Late Neoproterozoic magmatic record of the Jiamusi-Khanka Block, Northeast China: New clues from amphibolite zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopes. *Geological Journal*, 55: 3401~3415.
- Harley S L. 2021. UHT metamorphism. In D. Alderton S. Elias (Eds.), *Encyclopedia of Geology* (2nd ed.). Amsterdam: Elsevier, 522~552.
- Hawkesworth C, Cawood P, Kemp T, Storey C, Dhuime B, Mazur E. 2009. A matter of preservation. *Science*, 323: 49~50.
- He Zhenyu, Klemd R., Zhang Zeming, Zong Keqing, Sun Lixin, Tian Zuolin, Huang Botao. 2015. Mesoproterozoic continental arc magmatism and crustal growth in the eastern Central Tianshan arc terrane of the southern Central Asian Orogenic Belt: geochronological and geochemical evidence. *Lithos*, 236: 74~89.
- He Zhenyu, Klemd R, Yan Lili, Zhang Zeming. 2018. The origin and crustal evolution of microcontinents in the Beishan orogen of the southern Central Asian Orogenic Belt. *Earth-Science Reviews*, 185: 1~14.
- Hoffman F P. 1991. Did breakout of Laurentia turn Gondwana inside-out? *Science*, 252: 1409~1411.
- Hoffman F P. 2019. Big Time. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47(1): 1~17.
- Holland H D. 2006. The oxygenation of the atmosphere and oceans. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 361(1470): 903~915.
- Hu Bo, Zhai Mingguo, Li Tiesheng, Li Zhong, Peng Peng, Guo Jinghui, Kusky T M. 2012. Mesoproterozoic magmatic events in the eastern North China Craton and their tectonic implications: Geochronological evidence from detrital zircons in the Shandong Peninsula and North Korea. *Gondwana Research*, 22: 828~842.
- Hu Jianmin, Gong Wangbin, Wu Sujuan, Liu Yang, Liu Shaochang. 2014. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Langshan Group in the northeast margin of the Alxa block, with tectonic implications. *Precambrian Research*, 255: 756~770.
- Huang Zongying, Yuan Chao, Long Xiaoping, Zhang Yunying, Du Long. 2019. From Breakup of Nuna to Assembly of Rodinia: A Link Between the Chinese Central Tianshan Block and Fennoscandia. *Tectonics*, 38: 4378~4398.
- Huang Hu, Cawood P A, Hou Mingcai, Xiong Fuhao, Ni Shijun, Gong Tingting. 2019. Provenance of latest Mesoproterozoic to early Neoproterozoic (meta)-sedimentary rocks and implications for paleogeographic reconstruction of the Yili Block. *Gondwana Research*, 72: 120~138.
- Hynes A, Rivers T. 2010. Protracted continental collision—evidence from the Grenville Orogen. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 47(5): 591~620.
- Inner Mongolia autonomous region bureau of geology and mineral resources exploration. 1991&. *Regional geology of Inner Mongolia autonomous region*, Beijing: Geological Publishing House, 1~350.
- Ji Weiqiang, Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Zhang Chang, Liu Tong, Wang Jiangang, Paterson S R. 2020. Pervasive Miocene melting of thickened crust from the Lhasa terrane to Himalaya, southern Tibet and its constraint on generation of Himalayan leucogranite. *Geochim*

- et *Cosmochim Acta*, 278: 137~156.
- Khanchuk A I, Vovna G M, Kiselev V I, Mishkin M A, Lavrik S N. 2010. First Results of Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating of the Rocks from the Granulite Complex of Khanka Massif in the Primorye Region. *Doklady Earth Sciences*, 434(1): 1164~1167.
- Kröner A, Alexeiev D, Rojas-Agramonte Y, Hegner E, Wong J, Xia Xiaping, Belousova E, Mikolaichuk A, Seltnann R, Liu Dunyi. 2013. Mesoproterozoic (Grenville-age) terranes in the Kyrgyz North Tianshan: zircon ages and Nd—Hf isotopic constraints on the origin and evolution of basement blocks in the southern Central Asian Orogen. *Gondwana Research*, 23: 272~295.
- Kusky T M. 2011. Geophysical and geological tests of tectonic models of the North China Craton. *Gondwana Research*, 20: 26~35.
- Lee C T A, Morton D M, Kistler R W, Baird A K. 2007. Petrology and tectonics of Phanerozoic continent formation: From island arcs to accretion and continental arc magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 263, 370~387.
- Levashova N M, Kalugin V M, Gibsher A S, Yff J, Ryabinin A B, Meert J G, Malone S J. 2010. The origin of the Baydaric Microcontinent, Mongolia: constraints from paleomagnetism and geochronology. *Tectonophysics*, 485: 306~320.
- Levashova N M, Meert J G, Gibsher A S, Grice W C, Bazhenov M L. 2011. The origin of microcontinents in the Central Asian Orogenic Belt: Constraints from paleomagnetism and geochronology. *Precambrian Research*, 185: 37~54.
- Li Changhai, Liu Zhenghong, Dong Xiaojie, Xu Zhongyuan, Wen Kai, Wang Shijie, Wang Chen, Gao Yu. 2021. Mesoproterozoic (~1.4 Ga) magmatism in the Liaoyuan Accretionary Belt, NE China: New implications for tectonic affinity and crustal evolution of microcontinents along the southern Central Asian Orogenic Belt. *Precambrian Research*, 365: 106389.
- Li Gongyu, Zhou Jianbo, Li Long, Han Jie, Song Mingchun. 2019. Paleoproterozoic basement of the Xing'an Block in the eastern Central Asian Orogenic Belt: Evidence from the geochemistry and zircon U-Pb geochronology of granitic gneisses. *Precambrian Research*, 331: 105372.
- Li Sanzhong, Suo Yanhui, Liu Bo, Liu Yongjiang, Li Xiyao, Zhao Shujuan, Zhu Junjiang, Wang Guangzeng, Zhang Guowei. 2018&. Microplate tectonics theory: insights from microblocks in the global oceans and continental margins. *Earth Science Frontiers*, 25(5): 324~355.
- Li Shuanglin, Ouyang Ziyuan. 1998&. Tectonic framework and evolution of Xing'anling—Mongolian Orogenic Belt (XMOB) and its adjacent region. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1998(3): 46~55.
- Li Xianhua, Li Wuxian, He Bin. 2012&. Building of the South China Block and its relevance to assembly and breakup of Rodinia supercontinent: Observations, interpretations and tests. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(6): 543~559.
- Li Xianhua. 2021&. The major driving force triggering breakup of supercontinent: mantle plumes or deep subduction. *Acta Geologica Sinica*, 95(1): 20~31.
- Li Zhengxiang, Bogdanova S V, Collins A S, Davidson A, De Waele B, Ernst R E, Fitzsimons I C W, Fuck R A, Cladkochub D P, Jacobs J, Karlstrom K E, Lu S, Natapov L M, Pease V, Pisarevsky S A, Thrane K, Vernikovsky V. 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis. *Precambrian Research*, 160: 179~210.
- Liu Chaohui, Zhao Guochun, Liu Fulai, Shi Jianrong. 2017. Detrital zircon U-Pb and Hf isotopic and whole-rock geochemical study of the Bayan Obo Group, northern margin of the North China Craton: implications for Rodinia reconstruction. *Precambrian Research*, 303: 372~391.
- Liu Huichuan, Li Yinglei, Wan Zhifeng, Lai C K. 2020. Early Neoproterozoic tectonic evolution of the Erguna Terrane (NE China) and its paleogeographic location in Rodinia supercontinent: Insights from magmatic and sedimentary record. *Gondwana Research*, 88: 185~200.
- Liu Huichuan, Jun Shao, Zhu Guangyou, Li Yinglei. 2021. Neoproterozoic basement, mantle enrichment and crustal extraction in central Asia: petrogenesis of 2.5 Ga amphibolite and metadiorite in NE China. *American Journal of Science*, 321(10): 1350~1379.
- Liu Yongjiang, Li Weimin, Ma Yongfei, Feng Zhiqiang, Guan Qingbin, Li Sanzhong, Chen Zhaoxu, Liang Chenyue, Wen Quanbo. 2021. An orocline in the eastern central asian orogenic belt. *Earth-Science Reviews*, 221(1): 103808.
- Lu Songnian. 1998&. A Review of Advance in the Research on the Neoproterozoic Rodinia Supercontinent. *Geological Review*, 44(5): 489~495.
- Lu Songnian, Yang Chunliang, Li Huaikun, Chen Zhihong. 2002&. North China Continent and Columbia Supercontinent. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 9.
- Lu Songnian, Li Huaikun, Zhang Chuanlin, Niu Guanghua. 2008. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim craton and surrounding continental fragments. *Precambrian Research*, 160: 94~107.
- Luan Jinpeng, Xu Wenliang, Wang Feng, Wang Zhiwei, Guo Peng. 2017a. Age and Geochemistry of Neoproterozoic Granitoids in the Songnen—Zhangguangcai Range Massif, NE China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 148: 265~276.
- Luan Jinpeng, Wang Feng, Xu Wenliang, Ge Wenchun, Sorokin A A, Wang Zhiwei, Guo Peng. 2017b. Provenance, Age, and Tectonic Implications of Neoproterozoic Strata in the Jiamusi Massif: Evidence from U-Pb Ages and Hf Isotope Compositions of Detrital and Magmatic Zircons. *Precambrian Research*, 297: 19~32.
- Luan Jinpeng, Yu Jiejiang, Yu Jielu, Cui Yacuan, Xu Wenliang. 2019. Early Neoproterozoic Magmatism and Associated Metamorphism in the Songnen Massif, NE China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Precambrian Research*, 328: 250~268.
- Luan Jinpeng, Tang Jie, Xu Wenliang, Guo Peng, Long Xinyu, Xiong Shuai. 2022. Petrogenesis of Neoproterozoic magmatic rocks in the Songnen Massif (northeastern China): Implications for basement composition and crustal growth. *Precambrian Research*, 376: 106687.
- Lyons T W, Reinhard C T, Planavsky N J. 2014. The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere. *Nature*, 506: 307~315.
- Ma Haitao, Chen Jiafu, Ma Xu, Meng Yunxi. 2022. Paleoproterozoic magmatic—sedimentary events in eastern Baianmiao micro-block: Implications for Precambrian tectonic evolution of a fragment from Columbia supercontinent. *Precambrian Research*, 377: 106698.
- Meert J G, Santosh M. 2017. The Columbia supercontinent revisited. *Gondwana Res*, 50: 67~83.
- Miao Laicheng, Liu Dunyi, Zhang Fuqin, Fan Weiming, Shi Yurao, Xie Hangqiang. 2007 #. Zircon SHRIMP U-Pb ages of the

- “Xinghuadukou Group” in Hanjiayuanzi and Xinlin areas and the “Zhalantun Group” in Inner Mongolia, Great Xing’an Range. *Chinese Science Bulletin*, 52(8): 112~1124.
- Mulder J A, Everard J L, Cumming G, Meffre S, Bottrill R S, Merdith A S, Halpin J A, McNeill A W, Cawood P A. 2019. Neoproterozoic opening of the Pacific Ocean recorded by multi-stage rifting in Tasmania, Australia. *Earth-Science Reviews*, 201: 103041.
- Murphy J B, Pisarevsky S, Nance R D. 2013. Potential geodynamic relationships between the development of peripheral orogens along the northern margin of Gondwana and the amalgamation of West Gondwana. *Mineralogy and Petrology*, 107: 635~650.
- Pei Fuping, Xu Wenliang, Yang Debin, Zhao Quanguo, Liu Xiaoming, Hu Zhaochu. 2007. Zircon U-Pb Geochronology of Basement Metamorphic Rocks in the Songliao Basin. *Chinese Science Bulletin*, 52(7): 942~948.
- Peng Peng. 2015. Precambrian mafic dyke swarms in the North China Craton and their geological implications. *Science China (Earth Sciences)*, 58(5): 649~677.
- Petersson A, Schersten A, Andersson J, Whitehouse M J, Baranoski M T. 2015. Zircon U-Pb, Hf and O isotope constraints on growth versus reworking of continental crust in the subsurface Grenville orogen, Ohio, USA. *Precambrian Research*, 265: 313~327.
- Pisarevsky S A, Elming S A, Pesonen L J. 2014. Mesoproterozoic paleogeography: Supercontinent and beyond. *Precambrian Research*, 244: 207~225.
- Poller U, Gladkochub D, Donskaya T, Mazukabzov A, Sklyarov E, Todt W. 2005. Multi-stage magmatic and metamorphic evolution in the Southern Siberian craton: Archean and Paleoproterozoic zircon ages revealed by SHRIMP and TIMS. *Precambrian Research*, 136: 353~368.
- Pulsipher M A, Dehler C M. 2019. U-Pb detrital zircon geochronology, petrography, and synthesis of the middle Neoproterozoic Visingsö Group, Southern Sweden. *Precambrian Research*, 320: 323~333.
- Qian Cheng, Chen Huijun, Lu Lu, Pang Xuejiao, Qin Shi, Wang Yan. 2018. The Discovery of Neoarchean Granite in Longjiang Area, Heilongjiang Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(1): 27~36.
- Ramos. 2010. The Grenville-age basement of the Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 29: 77~91.
- Roberts N M W, Slagstad T. 2015. Continental growth and reworking on the edge of the Columbia and Rodinia supercontinents: 1.86~0.9 Ga accretionary orogeny in southwest Fennoscandia. *International Geological Review*, 57: 1582~1606.
- Rogers J W, Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent. *Gondwana Research*, 5: 5~22.
- Safonova I Y, Santosh M. 2014. Accretionary complexes in the Asia-Pacific region: Tracing archives of ocean plate stratigraphy and tracking mantle plumes. *Gondwana Research*, 25(1): 126~158.
- Santosh M. 2010. Assembling North China Craton within the Columbia supercontinent: The role of double-sided subduction. *Precambrian Research*, 178, 149~167.
- Shao Jun, Li Yongfei, Zhou Yongheng, Wang Hongbo, Zhang Jing. 2015. Neo-Archaean magmatic event in Erguna massif of Northeast China: evidence from the zircon LA-ICP-MS dating of the gneissic monzogranite from the Drill. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 45(2): 364~373.
- Shen Qihan, Geng Yuansheng, Song Huixia. 2016. Constituents and evolution of the metamorphic basement of the North China craton. *Acta Geoscientica Sinica*, (4): 387~406.
- Shi Yuruo, Wilde S A, Zhao Xitao, Ma Yinsheng, Du Lilin, Liu Dunyi. 2012. Late Neoproterozoic magmatic and subsequent metamorphic events in the northern North China Craton: SHRIMP zircon dating and Hf isotopes of Archean rocks from Yunnengshan Geopark, Miyun, Beijing. *Gondwana Research*, 21: 785~800.
- Smits R G, Collins W J, Hand M, Dutch R, Payne J. 2014. A Proterozoic Wilson cycle identified by Hf isotopes in central Australia: Implications for the assembly of Proterozoic Australia and Rodinia. *Geology*, 42(3): 155~155.
- Sorokin A A, Ovchinnikov R O, Xu Wenliang, Kovach V P, Yang Hao, Kotov A B, Ponomarchuk V A, Travin A V, Plotkina Y V. 2019. Ages and nature of the protolith of the Tulovchikha metamorphic complex in the Bureyassif, Central Asian Orogenic Belt, Russia: evidence from U—Th—Pb, Lu—Hf, Sm—Nd, and ⁴⁰Ar/³⁹Ar date. *Lithos*, 332~333: 340~354.
- Spencer C J, Cawood P A, Hawkesworth C J, Prave A R, Roberts N M, Horstwood M S, Whitehouse M J. 2015. Generation and preservation of continental crust in the Grenville Orogeny. *Geoscience Frontiers*, 6: 357~372.
- Spencer C J, Kirkland C L, Prave A R, Strachan R A, Pease V. 2019. Crustal reworking and orogenic styles inferred from zircon Hf isotopes: Proterozoic examples from the North Atlantic region. *Geoscience Frontiers*, 10: 417~424.
- Spencer C J, Mitchell R N, Brown M. 2021. Enigmatic mid-Proterozoic orogens: Hot, thin, and low. *Geophysical Research Letters*, 48: e2021GL093312.
- Sun Guozheng, Liu Shuwen, Lü Yongjun, Li Sanzhong, Gao Lei, Hu Yalu, Wang Wei, Guo Rongrong. 2022. Chronological framework of Precambrian Dantazi Complex: Implications for the formation and evolution of the northern North China Craton. *Precambrian Research*, 379: 106819.
- Sun Lixin, Ren Bangfang, Zhao Fengqing, Gu Yongchang, Li Yanfeng, Liu Hui. 2013. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic compositions of the Meso-proterozoic granitic gneiss in Xilinhot Block, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 32(2/3): 327~340.
- Sun Lixin, Ren Bangfang, Wang Shuqing, Xu Xinying, Zhang Yun. 2018. Petrogenesis of the mesoproterozoic gneissic granite in the Sonid Left Banner area, Inner Mongolia, and its tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 92(11): 2167~2189.
- Sun Lixin, Zhang Yun, Li Yanfeng, Xu Fan, Ren Bangfang. 2020. Zircon U-Pb age and geochemistry of the Mesoproterozoic gneissic granite from Abaga Banner, Inner Mongolia and its tectonic significances. *Acta Petrologica Sinica*, 36(3): 781~798.
- Tang Jie, Xu Wenliang, Wang Feng, Wang Wei, Xu Meijun, Zhang Yihan. 2013. Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic magmatism in the Erguna Massif, NE China: Petrogenesis and implications for the breakup of the Rodinia supercontinent. *Precambrian Research*, 224: 597~611.
- Tang Ming, Ji Weiqiang, Chu Xu, Wu Anbin, Chen Chen. 2021. Reconstructing crustal thickness evolution from europium anomalies in detrital zircons. *Geology*, 49(1): 76~80.
- Taylor S R, McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, 33: 241265.
- Trail D, Bruce Watson E, Tailby N D. 2012. Ce and Eu anomalies in zircon as proxies for the oxidation state of magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 97: 70~87.
- Turkina O M, Berezhnaya N G, Lepekhina E N, Kapitonov I N. 2012.

- U-Pb (SHRIMP II), Lu—Hf isotope and trace element geochemistry of zircons from high-grade metamorphic rocks of the Irkut terrane, Sharyzhalgai Uplift: Implications for the Neoproterozoic evolution of the Siberian Craton. *Gondwana Research*, 21(4).
- Turkina O M, Kapitonov I N, Sergeev S A. 2013. The isotope composition of Hf in zircon from Paleoproterozoic plagiogneisses and plagiogranitoids of the Sharyzhalgai uplift (southern Siberian craton): Implications for the continental-crust growth. *Russian Geology and Geophysics*, 54(3): 272~282.
- Turner C C, Meert J G, Pandit M K, Kamenov G D. 2014. Adetrital zircon U-Pb and Hf isotopic transect across the Son Valley sector of the Vindhyan Basin, India: implications for basin evolution and paleogeography. *Gondwana Research*, 26(1): 348~364.
- Van Schmus W R, Bickford M E, Turek A. 1996. Proterozoic geology of the east—central midcontinent basement. In: van der Pluijm, B., Catocinos, P. (Eds.), *Basement and Basins of Eastern North America*. Geological Society of America, 308: 7~32.
- Wang Chong, Mitchell R N, Murphy J B, Peng Peng, Spencer C J. 2020. The role of megacontinents in the supercontinent cycle. *The Geological Society of America*, 49(4): 402~406.
- Wang Feng, Xu Wenliang, Gao Fuhong, Zhang Haihong, Pei Fuping, Zhao Lei, Yang Yang. 2014. Precambrian Terrane within the Songnen—Zhangguangcai Range Massif, NE China: Evidence from U-Pb Ages of Detrital Zircons from the Dongfengshan and Tadong Groups. *Gondwana Research*, 26(1): 402~413.
- Wang Shaoyi, Liu Baoshan. 2014&. Characteristics of U-Pb chronology and geochemistry of Neoproterozoic granitic gneiss in Dongfengjingyingsuo of Yichun area. *Global Geology*, 33(4): 780~786.
- Wang Wei, Liu Xiaochun, Zhao Yue, Zheng Guanggao, Chen Longyao. 2016. U-Pb zircon ages and Hf isotopic compositions of metasedimentary rocks from the Grove Subglacial Highlands, East Antarctica: constraints on the provenance of protoliths and timing of sedimentation and metamorphism. *Precambrian Research*, 275: 135~150.
- Wang Ying, Zhang Fuqin, Zhang Dawei, Miao Laicheng, Li Tiesheng, Xie Hangqiang, Meng Qingren, Liu Dunyi. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Meta-diorite from the Basement of the Songliao Basin and Its Geological Significance. *Chinese Science Bulletin*, 51(15): 1877~1883.
- Wang Zhiwei, Wang Zhihui, Zhang Yanjie, Xu Bei, Li Yanguang, Tian Jingjie, Wang Yicun, Peng Jia. 2022a. Linking ~1.4~0.8 Ga volcano—sedimentary records in eastern Central Asian Orogenic Belt with southern Laurentia in supercontinent cycles. *Gondwana Research*, 105: 416~431.
- Wang Zhiwei, Zhu Taichang, Yu Jingwen, Yuan Lingling. 2022b. Forming Proterozoic basement within eastern Central Asian Orogenic Belt: Evidence from zircon U—Pb—Hf—O isotopes. *Journal of Central South University*, 29: 3088~3105.
- Wang Zhiwei, Peng Jia, Yu Jingwen, Zhu Taichang, Zhang Yanjie, Tian Yingjie, Xu Bei, Shi Jintian. 2022&. Meso- to Neoproterozoic zircon xenocrysts in Late Carboniferous granite from the western Xing'an Block: Record of the supercontinent evolution. *Geological Bulletin of China*, 41(2~3): 486~497.
- Wegener A. 1912. The origin of continents. *Geologische Rundschau*, 3: 276~292.
- Williams H, Hoffman P F, Lewry J F, Monger J W H, Rivers T. 1991. Anatomy of North America: thematic portrayals of the continent. *Tectonophysics*, 187: 117134.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Ge Wenchun, Zhang Yanbin, Grant M L, Wilde S A, Jahn B M. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41: 1~30.
- Wu Xinwei, Zhang Chao, Zhang Yujin, Guo Wei, Zhang Chao, Cui Tianri, Yang Yajun, Hu Jianfei, Song Wanbing. 2018. 2. 7Ga Monzogranite on the Songnen Massif and Its Geological Implications. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(3): 1265~1266.
- Wu Xinwei, Zhang Chao, Shao Jun, Guo Wei, Li Linchuan, Zhang Guangyu, Liu Baoshan, Song Wanbing. 2022&. The Neoproterozoic to Paleoproterozoic magmatic events in Longjiang area and Ulanhot area: Constraint on the attribute of Precambrian geological units in western Songnen massif. *Acta Petrologica Sinica*, 38(9): 2811~2828.
- Xie Hangqiang, Zhang Fuqin, Miao Laicheng, Chen Fukun, Liu Dunyi. 2008&. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the amphibolite from "Heilongjiang Group" and the granite in Mudanjiang area, NE China, and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1237~1250.
- Xu Bei, Zhao Pan, Bao Qingzhong, Zhou Yongheng, Wang Yanyang, Luo Zhiwen. 2014&. Preliminary study on the pre-Mesozoic tectonic unit division of the Xing—Meng Orogenic Belt (XMOB). *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1841~1857.
- Xu Bei, Zhao Pan, Wang Yanyang, Wen Liao, Luo Zhiwen, Bao Qingzhong, Zhou Yongheng. 2015. The Pre-Devonian Tectonic Framework of Xing'an—Mongolia Orogenic Belt (XMOB) in North China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 183~196.
- Xu Tong, Pei Xianzhi, Liu Chengjun, Chen Youxin, Li Ruibao, Li Zuochen, Pei Lei. 2016&. Geochemical Features and Zircon LA-ICP-MS U-Pb Ages of the Neoproterozoic Zhangergou Metamorphic Andesitic Rocks in the Mianxian—Lüeyang Area of South Qinling Orogen: Evidence for Amalgamation of Rodinia Supercontinent. *Geological Review*, 62(2): 434~450.
- Xu Wenliang, Sun Chenyang, Tang Jie, Luan Jinpeng, Wang Feng. 2019&. Basement Nature and Tectonic Evolution of the Xing'an—Mongolian Orogenic Belt. *Geoscience*, 44(5): 1620~1646.
- Yang Hao, Ge Wenchun, Zhao Guochun, Bi Junhui, Wang Zhihui, Dong Yu, Xu Wenliang. 2017. Zircon U-Pb ages and geochemistry of newly discovered Neoproterozoic Orthogneisses in the Mishan Region, NE China: Constraints on the High-Grade Metamorphism and Tectonic Affinity of the Jiamusi—Khanka Block. *Lithos*, 268~271: 16~31.
- Yang Hao, Ge Wenchun, Bi Junhui, Wang Zhihui, Tian Dexin, Dong Yu, Chen Huijun. 2018. The Neoproterozoic—Early Paleozoic evolution of the Jiamusi Block, NE China and its east gongwana connection: geochemical and zircon U—Pb—Hf isotopic constraints from the Mashan Complex. *Gondwana Research*, 54: 102~121.
- Yang Zhenning, Wang Zhiwei, Zhang Liyang, Xu Bei, Yan Linjie. 2021. Building the Proterozoic basement of the western Xing'an—Airgin Sum Block in the eastern Central Asian Orogenic Belt and its implications for the Nuna breakup and Rodinia assembly. *Precambrian Research*, 366: 106420.
- Yao Weihua, Li Zhengxiang, Li Wuxian, Li Xianhua. 2017. Proterozoic tectonics of Hainan Island in supercontinent cycles: new insights from geochronological and isotopic results. *Precambrian Research*, 290: 86~100.
- Yarmolyuk V V, Kovalenko V I, Sal'nikova E B, Kozakov I K, Kotov A

- B, Kovach V P, Vladikin N V, Yakovleva S Z. 2005. U-Pb Age of Syn- and Postmetamorphic Granitoids of South Mongolia: Evidence for the Presence of Grenvillides in the Central Asian Fold belt. *Doklady Earth Science*, 404 (7): 986~990.
- Yin Changqing, Zhao Guochun, Guo Jinhui, Sun Ming, Xia Xiaoping, Zhou Xiwen, Liu Chaohui. 2011. U-Pb and Hf isotopic study of zircons of the Helanshan Complex: Constrains on the evolution of the Khondalite Belt in the Western Block of the North China Craton. *Lithos*, 122: 25~38.
- Zhai Mingguo, Liu Wenjun. 2003. Palaeoproterozoic tectonic history of the north China Craton: A review. *Precambrian Research*, 122: 183~199.
- Zhai Mingguo, Li Tiesheng, Peng Peng, Hu Bo, Liu Fu, Zhang Yanbin. 2010. Precambrian key tectonic events and evolution of the North China Craton. Geological Society London Special Publications, 338: 235~262.
- Zhai Mingguo, Santosh M. 2011. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. *Gondwana Research*, 20: 6~25.
- Zhang Chao, Wu Xinwei, Liu Zhenghong, Zhang Yujin, Guo Wei, Quan Jingyu. 2018. Precambrian geological events on the western margin of Songnen massif: Evidence from LA-ICP-MS U-Pb geochronology of zircons from Paleoproterozoic granite in the Longjiang area. *Acta Petrologica Sinica*, 34(10): 3137~3152.
- Zhang Chuanlin, Zou Haibo, Li Huaikun, Wang Hongyan. 2013. Tectonic framework and evolution of the Tarim Block in NW China. *Gondwana Research*, 23(4).
- Zhang Kan, Zhu Xiangkun, Wood R A, Yao Shi, Gao Zhaofu, Simon W P. 2018. Oxygenation of the Mesoproterozoic ocean and the evolution of complex eukaryotes. *Nature Geoscience*, 11(5): 345~350.
- Zhang Liyang, Wang Zhiwei, Xu Bei, Zou Haibo, Zhao Pan, Zhang Hao. 2022. Neoproterozoic - Early Cambrian igneous and sedimentary sequences in the Songliao Block, NE China: Records of Rodinia supercontinent evolution in eastern Central Asian orogenic Belt. *Precambrian Research*, 381: 106865.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Santosh M. 2012. Mid-Mesoproterozoic bimodal magmatic rocks in the northern North China Craton: implications for magmatism related to breakup of the Columbia supercontinent. *Precambrian Research*, 222~223: 339~367.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Li Xianhua, Ernst R E, Yang Zhenyu. 2017. The 1.33~1.30 Ga Yanliao large igneous province in the North China Craton: Implications for reconstruction of the Nuna (Columbia) supercontinent, and specifically with the North Australian Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 465: 112~125.
- Zhang Shuanhong, Ernst R E, Munson T J, Pei Junling, Hu Guohui, Liu Jianmin, Zhang Qiqi, Cai Yuhang, Yue Zhao. 2022. Comparisons of the Paleo-Mesoproterozoic large igneous provinces and black shales North China and North Australian cratons. *Fundamental Research*, 2: 84~100.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Pei Junling, Wang Hongyu, Hu Guohui, Zhang Qiqi, Cai Yuhang, Kong Linghao, Wang Sen, Wang Kai. 2022. A review on large igneous provinces (LIPs) and their implications for paleogeographic reconstruction and continental breakup. *Geological Review*, 68(5): 1634~1652.
- Zhang Yanlong, Liu Chuankou, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Chu Zhuyin. 2011. Ancient sub-continental lithospheric mantle (SCLM) beneath the eastern part of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB): implications for crust - mantle decoupling. *Lithos*, 126: 233~247.
- Zhang Yihan, Xu Wenliang, Wang Feng, Xu Meijun, Wang Wei. 2014. Age and provenance of the Ergunahe Group and the Wubinaobao Formation, northeastern Inner Mongolia, NE China: implications for tectonic setting of the Erguna Massif. *International Geology Review*, 56(6): 653~671.
- Zhao Guochun, Sun Min, Wilde S A, Li Sanzhong. 2003. Assembly, Accretion and Breakup of the Paleo-Mesoproterozoic Columbia Supercontinent: Records in the North China Craton. *Gondwana Research*, 6: 417~434.
- Zhao Guochun, Sun Min, Wilde S A, Li Sanzhong. 2004. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup. *Earth-Science Reviews*, 67: 91~123.
- Zhao Guochun, Sun Ming, Wilde S A, Li Sanzhong. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited. *Precambrian Research*, 136: 177~202.
- Zhao Guochun, Cawood P A, Li Sanzhong, Wilde S A, Sun Min, Zhang Jian, He Yanhong, Yin Changqing, 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion. *Precambrian Research*, 222~223: 55~76.
- Zhao Guochun, Zhai Mingguo. 2013. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: Review and tectonic implications. *Gondwana Research*, 23: 1207~1240.
- Zhao Guochun, Wang Yuejun, Huang Baochun, Dong Yunpeng, Li Sanzhong, Zhang Guowei, Yu Shan. 2018. Geological reconstructions of the east asian blocks: from the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea. *Earth-Science Reviews*, 186: 262~286.
- Zhao Guochun, Han Yigui, Yao Jinlong, Liu Qian, Zhang Donghai, Wang Chao, Tang Qing, Zhang Jian, Yin Changqing, Zhang Guowei. 2022. Environmental effects of assembly and breakup of supercontinents. *Acta Geologica Sinica*, 96(9): 3120~3127.
- Zhao Shuo, Xu Wenliang, Tang Jie, Li Yu, Guo Peng. 2016. Timing of formation and tectonic of the purportedly Neoproterozoic Jiageda Formation of the Erguna Massif, NE. China: Constraints from field geology and U-Pb geochronology of detrital and magmatic zircons. *Precambrian Research*, 281: 585~601.
- Zhou Jianbo, Wilde S A, Zhang Xingzhou, Zhao Guochun, Liu Fulai, Qiao Dewu, Ren Shoumai, Liu Jianhui. 2011. A > 1300 km late Pan-African metamorphic belt in NE China: New evidence from the Xing'an block and its tectonic implications. *Tectonophysics*, 509: 280~292.
- Zhou Jianbo, Wilde S A, Zhao Guochun, Han Jie. 2018. Nature and assembly of microcontinental blocks within the Paleo-Asian Ocean. *Earth Science Reviews*, 186: 76~93.
- Zhou Wenxiao, Ge Mengchun. 2013. Redefinition and Significance of Metamorphism Xilinhote Group in Xilinhote Area, Inner Mongolia, China. *Earth Science—Journal of China University*, 38(4): 715~724.
- Zhou Yinzhang, Han Baofu, Xu Zhao, Ren Rong, Su Li. 2013. The age of the Proterozoic rocks in Yingba area in western Inner Mongolia: Constraints on the distribution of the South Gobi microcontinent in the Central Asian orogenic belt. *Geological Bulletin of China*, 32(2/3): 318~326.
- Zhu Ziyi, Campbell I H, Allen C M, Burnham A D. 2020. S-type granites: Their origin and distribution through time as determined from detrital zircons. *Earth and Planetary Science Letters*, 536:

116140.

Zhu Ziyi, Campbell I H, Allen C M, Brocks J, Chen Bei. 2022. The temporal distribution of Earth’s supermountains and their potential link to the rise of atmospheric oxygen and biological evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 580: 117391.

Zong Keqing, Klemm R, Yuan Yu, He Zhenyu, Guo Jingliang, Shi Xiaoli, Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zhang Zeming. 2017. The assembly of Rodinia: the correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB). *Precambrian Research*, 290: 32~48.

Magmatic and sedimentary records of Columbia—Rodinia supercontinent cycle in microcontinents within eastern central Asian orogenic belt

WANG Zhiwei^{1, 2)}, LIU Zhenyu^{1, 2)}, YANG Zhenning^{1, 2)}, WANG Zhihui^{1, 2)}, XU Bei^{1, 2)},
LI Canqing³⁾, SUN Yuxin^{1, 2)}, XU Yin^{1, 2)}, ZHU Taichang^{1, 2)}

- 1) Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang, 050031;
- 2) Hebei Province Collaborative Innovation Center for Strategic Critical Mineral Research, College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang, 050031;
- 3) No. 209 Geological Party, Geological Bureau of Yunnan Nuclear Industry, Kunming, 650032

Abstract: In the eastern Central Asian orogenic belt (CAOB), there are several micro-continents with Precambrian basement (e. g., Erguna, Xing’an, Songnen and Jiamusi blocks), where a large number of Proterozoic geological records occurred, including 2.5~2.4 Ga, 1.8 Ga, 1.5~1.4 Ga, 0.9~0.6 Ga magmatic events and Meso—Neoproterozoic sedimentary sequences. They are the key objects to answer the evolutionary relationship between micro-continents and the Columbia and Rodinia supercontinents and the evolution of the Earth’s middle age. The Erguna, Xing’an and Songnen blocks have similar 2.5~1.8 Ga basement rocks and lack of ancient ophiolite, which may constitute a combined continental block. The ancient nucleus of the block was formed at least before 2.7 Ga. This combined block likely broke up and evolved on the periphery of the northern North China Craton. The block underwent oceanic slab subduction at 2.5 Ga and 1.8 Ga, and did not participate in the cratonization. The 1.87~1.80 Ga magmatism was probably formed by the peripheral subduction along the edge of Columbia supercontinent beneath the ancient micro-continents. The 1.45~1.32 Ga A-type granite—rhyolite assemblage in western Xing’an Block and Baicaimia arc belt, and the continuously depleted trend of Hf isotope to continental margin, are remarkably similar to that in Granite—Rhyolite Province in southern Laurentian, and Fennoscandia in southwestern Baltic Craton. It may be generated by retreating subduction on the periphery of the Columbia supercontinent. Retreating subduction and mantle upwelling beneath supercontinent jointly promoted the extension and breakup of the Columbia supercontinent. The western Xing’an Block developed similar rock assemblages, detrital zircon ages and Hf isotope changes, to the syn- and post-collision sedimentary sequences related to the Grenville orogeny. Moreover, the systematic changes of detrital zircon trace elements and Hf isotopes over time also reveal that the crust thickened significantly from 1.10 to 0.98 Ga, accompanied by dominant partial melting of ancient crustal materials, whereas during 0.9~0.8 Ga crust continued to thin, mainly with reworking of ancient crustal material. These two stages were basically consistent with the Grenville orogeny (1080~980 Ma) and subsequent post-collisional collapse extension. The 954 Ma syenogranites in the northeastern Songnen Block were probably the product of partial melting of sedimentary rocks in the post-collisional extension associated with the collision between Songnen and Jiamusi blocks, which may represent the response of the Rodinia assembly in the eastern CAOB. The advancing subduction along the periphery of the Rodinia supercontinent led to the collision collage between the Jiamusi block and the Songnen—Xing’an—Erguna combined block before 954 Ma. Meanwhile, the advancing subduction also generated middle- to high-K calc-alkaline basaltic—intermediate—felsic rock assemblage in the outerboard Jiamusi Block at 953~939 Ma, and formed extensive intermediate—felsic calc-alkaline magmatism in the innerboard blocks at 920~880 Ma. From 850 Ma, the retreating subduction resulted in

voluminous high-temperature calc-alkaline felsic rocks and bimodal magmatic rock assemblage produced on the Songnen and Erguna blocks. The joint block began to breakup continuously leading to the opening of the Paleo Mudanjiang Ocean and Paleo Xinlin Ocean at last before 777 Ma and 697 Ma, respectively. Additionally, passive continental margins developed on the northwestern Erguna Block and the eastern Songnen Block during 790~560 Ma. These magmatism and sedimentation recorded the assembly, extension to breakup of the Rodinia supercontinent in eastern CAOB. Besides, a large number of 1.5~1.3 Ga and 1.0~0.7 Ga "valley" geological records have been newly identified in the eastern CAOB and other blocks worldwide, which were related to the assembly, extension to breakup of the supercontinents, suggesting that the Earth's middle age was not the tectonic calm period as previously thought.

Keywords: eastern central Asian orogenic belt; micro-continent; Earth's middle age; Proterozoic; Columbia—Rodinia supercontinent; assembly and breakup

Acknowledgements: Projects supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41802053); National Pre-research Project of Hebei GEO University (No. KY2023002) and the Scientific and Technological Innovation Team Project of Hebei GEO University (No. KJCXTD-2021-05)

First and corresponding author: WANG Zhiwei, Ph. D., is a professor of Hebei GEO University, he received his BSc degree from the Jilin University in 2012 on Geology, and earned his Ph. D. degree from the Jilin University in 2017 on mineralogy, petrology, mineral deposit geology, his research focuses on geochronology, geochemistry, perology, tectonics, Precambrian supercontinent cycle, and the tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt; Email: wangzw14@mails.jlu.edu.cn; wangzw@hgu.edu.cn

Manuscript received on: 2023-01-08; Accepted on: 2023-04-17; Network published on: 2023-05-20
Doi: 10.16509/j.georeview.2023.05.001 **Edited by:** LIU Zhiqiang

