中亚造山带东南缘二叠纪-三叠纪花岗质岩浆演化对增生-碰撞过程的制约

吴迪迪¹, 李舫^{1*}, David CHEW², 刘铁翊¹, 郭东海¹

1. 中国地质科学院地质研究所自然资源部深地动力学重点实验室, 北京 100037;

2. Department of Geology, School of Natural Sciences, Trinity College Dublin, Dublin 2, Ireland

* 通讯作者, E-mail: lishan428@163.com

收稿日期: 2020-06-30; 收修改稿日期: 2020-11-17; 接受日期: 2020-12-29; 网络版发表日期: 2021-04-13

国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC061301)、国家自然科学基金项目(批准号: 41772232、41830216、41888101)和中国地质调查局项目(编号: DD20190358、DD20190001)资助

摘要 全球许多造山带都不同程度地经历了增生和碰撞造山阶段, 作为全球最大的显生宙增生型造山带, 中亚造山带是如何从俯冲增生演化到碰撞拼合是一个值得探究的问题. 文章报道了位于中亚造山带东南缘内蒙古中部地区二叠纪-三叠纪花岗岩新的锆石 U-Pb 年龄(266~235Ma)、地球化学和同位素数据, 并系统梳理了区域内已有资料, 从岩浆性质随时间演化的角度, 厘定出该地区从早二叠世俯冲到晚二叠世(软)碰撞的构造-岩浆演化特征. 从早二叠世到晚二叠世, 花岗岩类全岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值逐渐从正值演化到出现负值($\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值: 2.4~-19.5; $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值: 11.6~-33.7), 表明从增生演化到碰撞阶段, 岩浆源区的古老陆壳组分逐渐增多. 结合区域资料, 进一步确认了中亚造山带演化到晚期发生(软)碰撞的岩浆标志为仅沿索伦-西拉木伦缝合带零星线性展布的增厚下地壳来源的中-晚二叠世至中三叠世高 Sr/Y 花岗岩类. 同时, 沿索伦-西拉木伦缝合带自西向东, 增生-碰撞转换时期的花岗质岩浆活动的峰期年龄分别为约 264 和 251 Ma, 也反映了古亚洲洋自西向东“剪刀”状闭合的过程. 综合前人研究, 将中亚造山带东南缘二叠纪至三叠纪从增生到碰撞的岩浆-构造演化过程总结为三个阶段. (1) 早二叠世(约 285 Ma 前): 古亚洲洋双向俯冲, 新生弧岩浆作用发育阶段; (2) 中二叠世到中三叠世(约 285~235 Ma): 俯冲增生到碰撞拼合的构造-岩浆转换阶段, 由于造山带挤压汇聚导致板片断裂而引发岩浆物源从年轻地壳向古老地壳转变; (3) 晚三叠世(约 235 Ma 后), 后造山伸展相关的 A 型花岗岩和碱性岩浆作用发育阶段.

关键词 中亚造山带, 增生型造山带, 构造-岩浆演化, 软碰撞

1 引言

造山作用记录了大陆地壳形成、增生等演化过程中从俯冲到碰撞的一系列地质过程(例如: Cawood 等,

2009; Dewey, 2005), 除了新生地壳的添加程度以及碰撞的规模、方式和强度不同外, 全球许多造山带都不同程度经历了增生和碰撞造山过程(Cawood 等, 2009). 中亚造山带(图 1a)是全球最大的显生宙增生造山带,

中文引用格式: 吴迪迪, 李舫, Chew D, 刘铁翊, 郭东海. 2021. 中亚造山带东南缘二叠纪-三叠纪花岗质岩浆演化对增生-碰撞过程的制约. 中国科学: 地球科学, 51(6): 906-926, doi: [10.1360/N072020-0212](https://doi.org/10.1360/N072020-0212)

英文引用格式: Wu D, Li S, Chew D, Liu T, Guo D. 2021. Permian-Triassic magmatic evolution of granitoids from the southeastern Central Asian Orogenic Belt: Implications for accretion leading to collision. Science China Earth Sciences, 64(5): 788-806, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9714-5>

是古亚洲洋从中元古代到古生代末期长期俯冲-增生演化的结果, 发育了大量年轻地壳来源的岩浆作用(Jahn等, 2000; Şengör等, 1993; Windley等, 2007; Xiao等, 2015). 不同于经典的陆-陆碰撞造山作用, 多数学者认为中亚造山带演化末期经历了古亚洲洋板片双向俯冲和多地体的软碰撞过程, 因而缺乏跨构造单元的大规模构造缩短和高压变质等物质标志(Eizenhöfer和Zhao, 2018; Li等, 2016a, 2017; Xiao等, 2003). 那么, 是否发育俯冲增生阶段过渡到碰撞拼合阶段的岩浆标志, 还需要进一步研究. 本文旨在通过对从俯冲增生到最终碰撞过程的岩浆演化特征的刻画, 进一步了解中亚造山带这一巨型增生造山带最终演变过程中的岩浆演化规律.

已有研究表明, 中亚造山带在二叠纪晚期至三叠纪早期由增生演化为碰撞体系(Li等, 2016a, 2017; Schulmann和Paterson, 2011), 在此期间, 亚洲大陆也同时发生了其他一系列重大地质事件, 包括潘基亚超大陆的最终拼合(例如: Zhao等, 2018)、西伯利亚大火成岩省(Saunders等, 2007)和图瓦-蒙古的山弯构造的形成(Xiao等, 2018)等. 在中亚造山带东南缘内蒙古中部地区, 沿着缝合带发育的二叠纪-三叠纪花岗岩类可能对从俯冲增生到碰撞拼合的构造-岩浆演化过程研究提供重要信息.

本文报道了中亚造山带东南缘内蒙古中部地区二叠纪到三叠纪花岗岩类新的锆石U-Pb年龄、地球化学和同位素数据, 总结了其时空分布特征, 确定了岩石成因和构造环境. 同时, 沿索伦-西拉木伦缝合带, 进一步确认了与碰撞有关的加厚下地壳来源的高Sr/Y花岗岩类记录了古亚洲洋最终闭合和俯冲-增生活动的终止(图1b). 结合区域资料, 我们提出了二叠纪至三叠纪从俯冲增生到碰撞拼合的三阶段构造-岩浆演化模型.

2 大地构造背景

位于内蒙古中部的中亚造山带东南缘, 其大地构造单元从北到南, 依次为南蒙古地块、北部造山带、索伦-西拉木伦缝合带、南部造山带和华北克拉通北缘(图1b) (例如: Jian等, 2010; Xiao等, 2015; Li等, 2016a, 2017).

南蒙古地块以二连浩特断裂与北部造山带相分

隔, 主要由元古代片麻岩、片岩、石英岩和寒武纪灰岩、粉砂岩组成(例如: Xiao等, 2003; Xu等, 2013); 北部造山带以林西断裂与其南部的索伦-西拉木伦缝合带相隔, 主要包括元古代锡林浩特杂岩体、早古生代Hutag Uul地块、晚寒武世到晚志留世俯冲-增生杂岩体(约498~420Ma; Jian等, 2008)和石炭纪至早二叠世宝力道弧杂岩等(Chen等, 2009; Xu等, 2013). 该区石炭-二叠系为火山沉积地层, 被下三叠统幸福之路组不整合覆盖, 并发育有中生代花岗岩侵入体(例如: Li等, 2014). 索伦-西拉木伦缝合带长约2500km, 宽约50~100km, 由于沙漠覆盖只出露零星的早二叠世(299~280Ma)蛇绿混杂岩(Eizenhöfer和Zhao, 2018; Jian等, 2010; Song等, 2015), 区域内中二叠世浊积岩和晚二叠世陆相碎屑岩被未变形的中生代花岗岩类侵入, 三叠纪时经历低温变质作用(中-低 P/T 型; Zhang等, 2016). 南部造山带以西拉木伦断裂为界, 与其北部的索伦-西拉木伦缝合带相分隔, 主要由晚寒武世至早志留世(约488~438Ma)温都尔庙俯冲-增生杂岩和奥陶纪-志留纪白乃庙弧杂岩(Jian等, 2008; Xu等, 2013)所组成, 二叠纪地层不整合覆盖在奥陶纪片麻状石英闪长岩和石炭纪碳酸盐岩地层上(朱俊宾, 2015). 华北克拉通北缘与中亚造山带以赤峰-白云鄂博断裂为界(Xiao等, 2003; Zhang等, 2014b; Zhang等, 2011). 华北克拉通基底被中晚元古代白云鄂博群和扎尔泰山组不整合覆盖(Zhai和Santosh, 2011; Zhang等, 2014a). 晚古生代地层主要由砂岩和砾岩组成, 同时发育大量的晚古生代至早中生代侵入体(Zhang等, 2014a).

中亚造山带东南缘及华北克拉通北缘从晚石炭至三叠纪均有岩浆活动发育(Li等, 2016a, 2016b; Zhang等, 2009c, 2014a). 早二叠世末期, 北部造山带中发育的弧岩浆作用(277~275Ma)代表了从晚石炭到早二叠世长期陆缘弧岩浆作用的最后一次岩浆幕(Li等, 2016b), 与此同时, 华北克拉通北缘也同样处于安第斯型活动大陆边缘构造背景(324~274Ma; Zhang等, 2009c). 从二叠纪晚期到三叠纪初期, 沿索伦-西拉木伦缝合带及其南北两侧, 碰撞相关岩浆作用开始出现(例如: Li等, 2016a), 伴随着山间盆地沉积以及中 P/T 级绿片岩-蓝片岩相变质作用(Li等, 2016a; Xiao等, 2015; Zhang等, 2016). 进入三叠纪中后期, 区域上岩浆作用较为稀少, 均为造山后构造背景的岩浆响应(Chen等, 2009; 石玉若等, 2004; Yang等, 2012).

图1 中亚造山带东南缘花岗岩类分布-构造单元划分图

(a) 中亚造山带地质简图, 改自Jahn等(2000). (b) 中亚造山带东南缘花岗岩类分布图. 本次研究岩体位置如图: 善达花岗闪长岩(SD); 阿木乌苏花岗闪长岩(AMWS); 敖包图钾长石花岗岩(ABT); 苏左旗黑云母花岗岩(SZQ-2/-6). 花岗岩类数据收集点来源见网络版附表1(<http://earthcn.scichina.com>)

3 样品描述及分析方法

3.1 样品描述

研究区内沿索伦-西拉木伦缝合带, 广泛分布晚古生代至早中生代花岗岩类(图1b). 本次研究分别选取了位于北部造山带的苏尼特左旗岩体(简称苏左旗岩体)、南部造山带的善达岩体、华北克拉通北缘的阿木乌苏岩体和敖包图岩体, 测定了其锆石U-Pb年龄、全岩主微量元素含量以及全岩Sr-Nd同位素和锆石Hf同位素数据.

苏左旗岩体主体为中细粒黑云母花岗岩, 弱变形,

由斜长石(约30%)、钾长石(约40%)、石英(约25%)和黑云母(约5%)组成(图2e、2f). 善达岩体为弱变形细粒花岗闪长岩, 含闪长质包体, 由斜长石(40~50%)、角闪石(5~10%)、黑云母(15~25%)、石英(15~25%)和钾长石(10~15%)组成(图2a). 阿木乌苏岩体以灰白色细粒至中粒花岗闪长岩为主体, 主要矿物为斜长石(40~50%)、角闪石(10~20%)、黑云母(15~25%)、石英(15~25%)和钾长石(1~10%)(图2b、2c). 敖包图岩体为中粒钾长花岗岩, 由斜长石(20~25%)、钾长石(50~60%)、石英(20~25%)和黑云母(5~10%)组成(图2d).

图2 中亚造山带东南缘花岗岩类样品显微照片(正交镜下)

(a) 善达花岗闪长岩(SD); (b)、(c) 阿木乌苏花岗闪长岩(AMWS); (d) 敖包图钾长石花岗岩(ABT); (e)、(f) 苏左旗黑云母花岗岩(SZQ-2、SZQ-6). Bt, 黑云母; Kfs, 钾长石; Mc, 微斜长石; Pl, 斜长石; Qtz, 石英

本文共采集了13件样品用于全岩地球化学分析, 其中6件样品用于全岩Sr-Nd同位素分析. 5个样品(15MD-3、15SZWQ-4、15SZWQ-8、15ZQ-2和15ZQ-6)用于锆石U-Pb定年, 其中前4个样品同时用于锆石Lu-Hf同位素分析.

3.2 分析方法

3.2.1 全岩地球化学分析

所有样品在除去风化表面后被压碎, 然后用玛瑙研钵将小岩屑磨成粒度小于200目的粉末. 全岩地球化学分析在北京核工业地质研究所完成. 主量元素使用X射线荧光光谱仪测定, 详细方法过程见Norrish和Hutton(1969), 其中氧化亚铁采用湿法化学滴定法测定. 微量元素(包括稀土元素)按照Liang和Grégoire(2000)的方法采用ELEMENT XR等离子体质谱仪测定. 主要分析元素的不确定度一般在1%以内, 大多数微量元素的分析精度优于5%.

3.2.2 锆石U-Pb年龄分析

样品锆石颗粒采用重液法和磁法分选. 在双目显微镜下进一步进行手工挑选后, 将其固定在环氧树脂靶上, 抛光表面至1/2左右厚度. 锆石制靶完成后, 使用扫描电子显微镜拍摄其阴极发光图像, 确定内部结构,

并确保选择适宜的分析测点位置. 锆石制靶和阴极发光照相在南京宏创地质勘探技术服务有限公司完成. LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素分析在台湾大学地质科学系完成. 锆石U-Pb年龄测定采用New Wave UP 213激光剥蚀系统和Thermo Scientific Element 2 ICP-MS. 测定过程中使用直径为30μm、频率为10Hz的激光剥蚀束斑. 使用锆石标准GJ-1进行校准, 其加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$ 年龄为 $(600.4 \pm 2.5)\text{Ma}$ (MSWD=0.015, 95%置信度, $n=111$). 使用锆石标准91500和Plešovice用于数据质量控制. 普通铅校正采用Andersen(2002)的方法. 样品U-Pb同位素数据使用ISOPLOT软件计算和绘制(Ludwig, 2003). 分析数据在年龄协和图上不确定度为 1σ , 加权平均年龄的不确定度在95%置信度(2σ).

3.2.3 全岩Sr-Nd同位素分析

样品全岩Sr-Nd同位素测定在北京核工业地质研究院采用热电离质谱仪(TIMs)测定. 化学分离和同位素测量步骤详见Wu等(2005). $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值标准化为 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=8.375209$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值标准化为 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$. Sr和Nd的总空白分别小于300和100pg, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值的分析不确定度小于0.5%. 采用NBS 987作为Sr标准溶液, 测定过程中其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

比值为 (0.710250 ± 14) (2σ), 钕标准溶液采用SHINES-TU(Li等, 2016a), 其 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 (0.512113 ± 6) (2σ).

3.2.4 锆石Hf同位素分析

锆石Hf同位素分析使用New Wave UP213剥蚀系统和Nu Plasma多接收ICP-MS, 测试过程在台湾“中央”研究院地球科学研究所完成, 仪器条件和数据采集过程如Wu等(2006). 采用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.02658$ 和 $^{176}\text{Yb}/^{173}\text{Yb}=0.796218$ 比值校正 ^{176}Lu 和 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的同质异素干扰(Chu等, 2002). 仪器质量偏差校正, 使用指数法将Yb同位素比值标准化为 $^{172}\text{Yb}/^{173}\text{Yb}=1.3527452$, Hf同位素比值标准化为 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.7325$ (Chu等, 2002). 假设Lu的质量偏差行为遵循Yb的质量偏差行为, 质量偏差校正方案如Wu等(2005). Mud Tank锆石为测试过程中的参考标准, 其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 加权平均值为 (0.282494 ± 0.000028) (2σ , $n=19$).

4 分析结果

4.1 锆石U-Pb年龄

本次研究中所有样品的锆石颗粒大多呈无色、透明状, 主要为自形、粗短棱柱状晶体. 位于华北京拉通北缘的阿木乌苏花岗闪长岩(样品15MD-3)中的锆石

颗粒比其他样品更细长. 所有锆石的Th/U比值均大于0.1(0.1~1.53), 在CL图(图3)中, 所有样品均显示振荡环带, 表明其岩浆成因.

样品锆石U-Pb年龄数据均位于谐和线附近, 其加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为: 善达花岗闪长岩(样品15SZWQ-4): $(266 \pm 2.5)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.23$)($n=23$, 图4a); 阿木乌苏(花岗闪长岩(样品15MD-3): $(264 \pm 2.8)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.24$)($n=17$, 图4b); 敖包图钾长花岗岩(样品15SZWQ-8): $(259 \pm 2.6)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.33$)($n=22$, 图4c); 苏左旗黑云母花岗岩15ZQ-2和15ZQ-6: $(233 \pm 2.60)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.29$)($n=20$, 图4d)和 $(231 \pm 4.5)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.47$)($n=6$, 图4e). 这些年龄代表了花岗岩的结晶年龄, U-Pb同位素数据详见网络版附表2.

4.2 全岩主量、微量地球化学

样品全岩主量元素和微量元素数据详网络版附表3. 主量元素方面, 本文所研究的所有花岗岩体均属于钙碱性系列(图5a), 具有过铝质特征(图5b). 除南部造山带中二叠世善达花岗闪长岩外, 其他样品的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值均小于1. 大多数样品属于镁质花岗岩, 而华北京拉通北缘晚二叠世敖包图钾长花岗岩属于铁质花岗岩类(图5c). 稀土元素和微量元素方面, 善达花岗闪长岩显示轻微的Eu正异常($\delta\text{Eu}=1.05\sim 1.19$)(图5d), 微量元素蛛网图中Nb、Ta和Ti呈负异常, Rb和Ba具有微

图3 中亚造山带东南缘花岗岩类样品部分锆石阴极发光图像

(a) 善达花岗闪长岩(SD: 15SZWQ-4); (b) 阿木乌苏花岗闪长岩(AMWS: 15MD-3); (c) 敖包图钾长石花岗岩(ABT: 15SZWQ-8); (d)、(e) 苏左旗黑云母花岗岩(SZQ: 15ZQ-2; 15ZQ-6). 锆石U-Pb测年点(红色圆圈), 锆石Hf同位素测试点(黄色圆圈)及 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

图 4 中亚造山带东南缘花岗岩类样品锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图及加权平均年龄

(a) 善达花岗闪长岩(SD: 15SZWQ-4); (b) 阿木乌苏花岗闪长岩(AMWS: 15MD-3); (c) 敖包图钾长石花岗岩(ABT: 15SZWQ-8); (d)、(e) 苏左旗黑云母花岗岩(SZQ: 15ZQ-2; 15ZQ-6)

弱的正异常(图5e)。华北克拉通北缘中二叠世阿木乌苏花岗闪长岩具有微弱的Eu负异常($\delta\text{Eu}=0.93\sim0.96$)和平坦的重稀土(HREE)配分模式($\text{Dy}/\text{Yb}=1.62\sim1.65$)(图5d), 微量元素表现为Nb、Ta、Ti和P的负异常以及

Rb、K和Pb的正异常(图5e)。晚二叠世敖包图钾长花岗岩具有显著的Eu负异常($\delta\text{Eu}=0.28$), 表明强烈的斜长石分离结晶作用(图5d), 同时Ba、Nb、Ti、Sr呈负异常, Rb、Th、K呈正异常(图5e)。北部造山带晚三叠

图 5 中亚造山带东南缘花岗岩类样品主微量元素特征

(a) $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$ 比 SiO_2 图解; (b) ASI 比 SiO_2 图解; (c) $\text{TFeO}/(\text{TFeO} + \text{MgO})$ 比 SiO_2 图解, $\text{TFeO} = \text{FeO} + 0.899\text{Fe}_2\text{O}_3$; (d) 稀土元素球粒陨石标准化配分图解; (e) 微量元素原始地幔标准化蛛网图; (f) Sr/Y 比 Y 埃达克岩判别图解 (Richards 和 Kerrich, 2007). (a)~(c) 均改自 Frost 和 Frost (2008). 球粒陨石和原始地幔标准值来自 Sun 和 McDonough (1989). 1 ppm = 1 $\mu\text{g/g}$

世苏左旗黑云母花岗岩 (15ZQ-2 和 15ZQ-6) 的 REE 含量相对较低, 且存在显著的 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.35, 0.19$), 指

示斜长石发生了强烈的分离结晶 (图 5d), 同时 HREE 相对富集, Ba、Sr、Ti 和 P 具负异常, Rb、Th 和 K 具正异

常(图5e). 此外, 中二叠世善达花岗闪长岩具有较高的Sr/Y比值(31.5~36.7), 在埃达克岩判别图解中落入埃达克岩和典型岛弧安山岩-英安岩-流纹岩之间的过渡区域(图5f), 中二叠世阿木乌苏花岗闪长岩显示强的轻重稀土分馏程度($(La/Yb)_N=21.4\sim22.5$ (图5d)及高的Sr/Y比值(41.9~57.9)(图5f), 在埃达克岩判别图解中落入埃达克岩范围.

4.3 全岩Sr-Nd同位素

本文共选择了6个样品进行全岩Sr-Nd同位素分析(详细数据见表1). 南部造山带晚二叠世善达花岗闪长岩(样品15SZWQ-1和15SZWQ-4)初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值(Sr_i)分别为0.70634和0.70719, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值分别为-4.9和-6.9. 华北克拉通北缘中二叠世阿木乌苏花岗闪长岩(15MD-3)和晚二叠世敖包图钾长花岗岩(15SZWQ-8)初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值(Sr_i)分别为0.70669和0.71227, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值分别为-19.5和-14.0. 北部造山带晚三叠世的苏左旗黑云母花岗岩(样品15ZQ-2和15ZQ-6)初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值分别为0.70460和0.70846, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为-1.2(15ZQ-2)和0.8(15ZQ-6). 善达花岗闪长岩和苏左旗黑云母花岗岩的Nd模式年龄(T_{DM})为1.28~1.67Ga, 而阿木乌苏花岗闪长岩和敖包图钾长花岗岩具有更加古老的Nd模式年龄(T_{DM}), 为2.08~2.16Ga.

4.4 锆石Hf同位素

本文选取了4个样品进行锆石Hf同位素分析(详细数据列于网络版附表4). 华北克拉通北缘中二叠世阿木乌苏花岗闪长岩和晚二叠世敖包图钾长花岗岩具有相似的富集的Hf同位素组成, $\epsilon_{Hf}(t)$ 分别为-16.4~-9.7和-16.3~-8.3. 然而, 南部造山带中二叠世善达花岗

闪长岩和北部造山带晚三叠世苏左旗黑云母花岗岩显示出正的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值, 分别为2.8~6.8和6.7~12.4. 同时, 与阿木乌苏花岗闪长岩($T_{DM2}=2.2Ga$)和敖包图钾长花岗岩($T_{DM2}=1.9Ga$)相比, 善达花岗闪长岩和苏左旗黑云母花岗岩也具有更加年轻的平均两阶段Hf模式年龄(T_{DM2}), 分别为0.37和0.36Ga.

5 讨论

我们系统梳理了中亚造山带东南缘内蒙古中部地区二叠纪-三叠纪花岗岩类的岩石组合、岩体变形、年代学、地球化学和同位素数据特征以及相关的构造背景(图6). 由于该区域中部地区被浑善达克沙漠所覆盖, 露头稀少, 而且更为重要的是, 古亚洲洋是自西向东逐渐闭合的, 因此为了便于对比从西到东岩浆演化的差异, 我们将研究区域分为东西两段分别进行考察(图1b). 除本次研究的岩体外, 我们还系统收集了研究区二叠纪到三叠纪花岗岩类锆石U-Pb年龄、全岩地球化学和同位素数据. 系统地梳理发现花岗岩类数据在各构造单元中的分布并不均一, 西段内的数据稍微更集中于华北克拉通北缘和南部造山带南部, 而东段内的数据稍微更加集中于北部造山带和相邻的索伦-西拉木伦缝合带. 本研究中的中二叠世善达花岗闪长岩位于南部造山带, 中二叠世阿木乌苏花岗闪长岩和晚二叠世敖包图钾长花岗岩位于华北克拉通北缘, 晚三叠世苏左旗黑云母花岗岩则位于北部造山带.

5.1 二叠纪-三叠纪花岗质岩浆活动的时空演化

沿索伦-西拉木伦缝合带发育了一系列由板块汇聚所引发的晚二叠世至早三叠世的构造-岩浆事件, 以

表 1 中亚造山带东南缘花岗岩全岩Sr-Nd同位素测试结果^{a)}

样品	岩体	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$	2 σ	Sr_i	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	2 σ	$f_{Sm/Nd}$	$\epsilon_{Nd}(t)$	T_{DM} (Ga)
15SZWQ-1	善达	117	549.0	0.6188	0.708676	13	0.70634	3.36	19.60	0.104	0.51223	15	-0.47	-4.9	1.28
15SZWQ-4	善达	132	488.0	0.7815	0.710135	11	0.70719	3.88	21.60	0.108	0.51213	12	-0.45	-6.9	1.47
15MD-3	阿木乌苏	137	323.0	1.2234	0.711281	11	0.70669	1.59	10.70	0.090	0.51145	18	-0.54	-19.5	2.08
15SZWQ-8	敖包图	222	66.9	9.6144	0.747555	9	0.71227	5.41	24.90	0.131	0.51181	8	-0.33	-14.0	2.16
15ZQ-2	苏左旗	186	31.1	17.2636	0.761810	11	0.70460	1.46	5.78	0.153	0.51251	9	-0.22	-1.2	1.61
15ZQ-6	苏左旗	247	34.9	20.4751	0.775444	13	0.70846	2.68	9.72	0.167	0.51263	10	-0.15	+0.8	1.67

a) $\epsilon_{Nd} = ((^{143}Nd/^{144}Nd)_s / (^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR} - 1) \times 10000$, $f_{Sm/Nd} = (^{147}Sm/^{144}Nd)_s / (^{147}Sm/^{144}Nd)_{CHUR} - 1$, s下标表示样品测试值, CHUR表示球粒陨石均一储库. $(^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR}$ 和 $(^{147}Sm/^{144}Nd)_{CHUR}$ 分别为0.512638和0.1967, $T_{DM} = 1/\lambda \times \ln(1 + ((^{143}Nd/^{144}Nd)_s - 0.51315) / ((^{147}Sm/^{144}Nd)_s - 0.2137))$.

图6 中亚造山带东南缘二叠纪至三叠纪花岗岩类岩浆-构造演化特征综合柱状图

左侧为研究区二叠纪至三叠纪花岗岩类锆石U-Pb年龄分布柱状图。其他类型岩体数据来源: 流纹岩(樊航宇等, 2014; 李可等, 2014); 玄武安山岩/安山岩(关庆彬等, 2016; 卿敏等, 2012; 张连昌等, 2008; Liu Y S等, 2012); 玄武岩(晨辰等, 2012; Chu等, 2013; Liu等, 2013; Miao等, 2007; Song等, 2015; 王炎阳等, 2014); 辉长岩/辉绿岩(晨辰等, 2012; Jian等, 2010; 刘建峰等, 2016; Miao等, 2007, 2008)。沉积相资料来自Li S等(2014)、Eizenhöfer和Zhao(2018)

及晚三叠世以来后造山相关岩浆活动(Li等, 2016a; Xiao等, 2015)。根据石炭纪-二叠纪弧花岗岩和蛇绿岩以及三叠纪高镁安山岩、S型花岗岩和高Sr/Y花岗岩等研究, 中亚造山带东南缘从增生到碰撞的转换时间集中在二叠纪末-三叠纪初(陈斌等, 2001; 李锦轶等, 2007; Chen等, 2009; Jian等, 2010; Li等, 2016a, 2017; Liu Y S等, 2012; Song等, 2015; Wu等, 2011)(图6)。同时, 该构造体制转换期也得到区域沉积记录和古地磁数据的支持(Eizenhöfer等, 2014, 2015; Huang等, 2018; Li等, 2014; Ren等, 2020; Xiao等, 2015; Zhang等, 2014)。

早-中二叠世与古亚洲洋俯冲相关的花岗质岩浆作用主要分布在南蒙古地体南缘(例如: Tian等, 2018; Wei等, 2018)、北部造山带东段(Li等, 2016b; Li Y L等, 2014; Wu等, 2011)和华北克拉通北缘(李斌等, 2018; 曾俊杰等, 2008; Zhang等, 2009a, 2009c)。晚二

叠世-中三叠世碰撞相关花岗岩类主要分布在索伦-西拉木伦缝合带(Li Y L等, 2014; 李锦轶等, 2007; Li等, 2017, 柳长峰等, 2011)、南部造山带(柳长峰等, 2010a; 章永梅等, 2009; 张维等, 2010)以及华北克拉通北缘(毛德宝等, 2003; 孟庆鹏等, 2013; Zeng等, 2012)。而晚三叠世造山后花岗质岩浆作用发生在北部造山带, 但仅出现在西段(Chen等, 2009; Hu等, 2015, 石玉若等, 2004)和华北克拉通北缘(柳长峰等, 2010a, Yang等, 2012)。不同构造单元花岗岩类的详细年龄分布见图7和网络版附表1。

然而, 从地球化学的角度来看, 从西到东, 整个研究区内花岗岩类地球化学以及全岩Nd同位素和锆石Hf同位素数据没有系统的变化趋势(图8~10)。我们认为这种地球化学特征自西向东的一致性实际上反映了整个研究区相对类似的构造-岩浆作用过程。不过, 值得注意的是, 以上类似的构造-岩浆过程发生的时间并

图 7 中亚造山带东南缘不同构造单元花岗岩类锆石U-Pb年龄分布柱状图

(a) 南蒙古地块南缘(SMT); (b) 北部造山带(NAO); (c) 索伦-西拉木伦缝合带(SXM); (d) 南部造山带(SAO); (e) 华北克拉通北缘(NCC)

图 8 中亚造山带东南缘二叠纪至三叠纪花岗类同位素特征

(a) 全岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值比 Sr_i 图解; (b) 锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值比锆石U-Pb年龄图解; (c) 全岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值比锆石U-Pb年龄图解. CHUR, 球粒陨石均一储库

不相同: 西段岩浆活动年龄峰期约为264Ma, 而东段岩浆活动年龄峰期约为251Ma(图6). 西段峰期花岗岩类主要分布在南部造山带和华北克拉通北缘, 记录了从俯冲到碰撞的转变过程(柳长峰等, 2010a, 2010b; 章永梅等, 2009). 而东段峰期花岗岩类主要分布在北部造山带和索伦-西拉木伦缝合带, 与碰撞引起的地壳增厚过程有关(Li等, 2016a, 2016b). 因此, 研究区内沿缝合带东西段不同的峰期年龄表明了古亚洲洋从西向东的穿时性闭合, 与前人提出的自西向东“剪刀式”状闭合的构造-岩浆过程相一致(Eizenhöfer和Zhao, 2018; Shi, 2006; Xiao等, 2009; Zhao等, 2018). 在中亚造山

带东南缘, 这一过程也进一步得到了二叠纪海相地层具有自西向东逐渐年轻化趋势的支持(赵英利等, 2016). 例如, 研究区内中二叠世以浅层海相沉积为主(以哲思组下部为代表; 朱俊宾, 2015), 但同时期索伦-西拉木伦缝合带东延的长春-延吉带内仍存在指示深海相的复理石沉积(王成文等, 2009年), 表明中二叠世残余海是由西向东逐渐闭合的. 此外, 古地磁资料也显示, 北部造山带所处的锡林浩特-松辽地体与华北克拉通之间在二叠纪晚期存在纬度趋同和相对旋转, 导致古亚洲洋在约265~246Ma之间从西向东呈“剪刀”状闭合(Ren等, 2020).

图9 中亚造山带东南缘二叠纪至三叠纪花岗岩类主量元素特征

(a) $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ 比 SiO_2 图解; (b) TAS图解(Ir-Irvine分界线, 据Irvine和Baragar, 1971); (c) ASI比 SiO_2 图解; (d) $^{\text{T}}\text{FeO}/(^{\text{T}}\text{FeO}+\text{MgO})$ 比 SiO_2 图解. 图源同图5

5.2 二叠纪-三叠纪花岗岩成因

花岗质岩浆活动记录了威尔逊旋回演化过程中从汇聚板块边界到板内裂谷作用的岩浆过程(Burke, 2011; Cawood等, 2009). 如图6所示, 中亚造山带东南缘二叠纪到三叠纪花岗质岩浆活动的主要峰期集中在早二叠世至中三叠世(约285~235Ma). 因此, 根据此峰期, 花岗质岩浆作用大致可分为三个阶段: (1) 早二叠世(约285Ma之前); (2) 中二叠世至中三叠世(约285~235Ma); (3) 晚三叠世(约235Ma之后). 这三个阶段的花岗质岩浆作用表现出不同的地球化学特征, 响应了不同的构造环境.

第一阶段早二叠世(约285Ma之前)花岗岩类, 显示出弱的轻、重稀土分馏程度(西段内平均 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=5.5$, 东段内平均 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=8.8$), 同时具有Eu负异常(图10a)和高场强元素(HFSE, 如Nb、Ta和Ti)的亏损, 显示出俯冲相关岩浆作用的特征(Briqueu等, 1984; Chen等, 2000; Li等, 2016b; Zhang等, 2009a). 该阶段花岗岩类具有较大的全岩Nd和锆石Hf同位素值变化范围($\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值从-12.1~2.4; 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 从-14.4~11.6), 说明岩浆源区同时包含有新生地壳和古老陆壳组分(图8). 但这些具有负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的花岗岩基本均出露在华北克拉通北缘, 表明与华北克拉通的古

图 10 中亚造山带东南缘二叠纪至三叠纪花岗质类稀土元素球粒陨石标准化配分和微量元素原始地幔标准化蛛网图解
(a)、(c)、(e)、(g) 稀土元素球粒陨石标准化配分图解; (b)、(d)、(f)、(h) 微量元素原始地幔标准化蛛网图。球粒陨石和原始地幔标准值来自 Sun 和 McDonough (1989)

老陆壳贡献有关.

第二阶段中二叠世至中三叠世花岗岩类(约 285~235Ma), 轻、重稀土分馏程度较强(西段内平均 $(La/Yb)_N=12.5$, 东段内平均 $(La/Yb)_N=19.9$), 与早二叠世花岗岩类相比, Eu 负异常不明显(图 10c、10e). 本文研究的位于南部造山带的中二叠世善达花岗闪长岩 $(266\pm 2.5)Ma$ 具有高的 MgO (2.22~2.30wt.%)、Cr (44.9~49.5ppm) 和 Ni (20.1~22.5ppm) 含量(数据见网络版附表 3), 表明有镁铁质岩浆源区的贡献. 善达花岗闪长岩具有负的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-6.9~-4.9), 和正的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(2.8~6.8), 显示新生地壳物质的加入. 位于华北克拉通北缘的中二叠世阿木乌苏花岗闪长岩 $(264\pm 2.8)Ma$ 具有埃达克质岩石特征(图 5f), 且其 MgO、Ni 和 Cr 含量较低, 更类似于加厚下地壳源区的埃达克岩(Wang 等, 2006). 晚二叠世敖包图钾长花岗岩 $(259\pm 2.6)Ma$ 则具有更高的演化程度, 表现为显著的 Ba、Nb、Ti、Sr 的负异常. 阿木乌苏花岗闪长岩和敖包图钾长花岗岩均具有显著负的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-19.5~-14.0) 和锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(-16.4~-8.3), 说明两者起源于古老的华北克拉通地壳. 同时, 研究区从第二阶段(约 285Ma)开始, 花岗岩类表现出显著负的全岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值特征(图 8b、8c), 反映自此阶段开始, 岩浆源区开始出现大规模的古老地壳组分. 此外, 沿索伦-西拉木伦缝合带两侧的第二阶段的部分花岗岩类显示出增厚下地壳源区的高 Sr/Y 比值花岗岩的特征, 尤其是在晚二叠世和早三叠世表现更加明显(图 11c).

第三阶段晚三叠世花岗岩类(约 235Ma 之后), 轻、重稀土分馏程度中等(西段内平均 $(La/Yb)_N=11.1$, 东段内平均 $(La/Yb)_N=12.6$), 同时 Eu 负异常显著(西段低至 0.04)(图 10g), 表明岩浆经历了强的分离结晶作用. 本研究中位于北部造山带的晚三叠世苏左旗黑云母花岗岩 $(231\sim 233Ma)$ 具有相对正的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-1.2~0.8) 和锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(6.7~12.4), 岩浆源区以新生地壳物质为主(图 8). 此外, 其 $10000\times Ga/Al$ 比值大于 2.6(2.64~2.81), 显示出 A 型花岗岩的特征(Whalen 等, 1987; 图 11d).

5.3 从俯冲增生到碰撞拼合的三阶段构造-岩浆演化过程

结合区域地质资料(图 6), 我们提出了二叠纪-三叠纪从俯冲增生到碰撞拼合的三阶段构造-岩浆演化模型, 以解释中-亚造山带东南缘从增生到碰撞是如何演

化的(图 12).

第一阶段(约为 285Ma 之前), 由于古亚洲洋的双向俯冲而形成大陆边缘弧岩浆作用(图 12a), 新生弧岩浆作用发育(张拴宏等, 2010; Shi 等, 2016; Tian 等, 2018; Wei 等, 2018; Xiao 等, 2003; Yuan 等, 2016; Zhang 等, 2009a, 2009b, 2009c). 尽管在此阶段内, 南蒙古地块南缘分布有一些碱性花岗岩或 A 型花岗岩, 但这些岩体更可能与古亚洲洋最后俯冲期间的板块后撤所造成伸展构造作用有关(图 12a). 这与澳大利亚东部多阶段的俯冲板片后撤和弧后伸展的情况类似(Cawood 等, 2011; Collins 和 Richards, 2008). 在此期间, 华北克拉通北缘为活动大陆边缘背景, 也形成了一系列与俯冲有关的钙碱性花岗岩类, 其源区具有明显的古老陆壳组分的贡献(张拴宏等, 2010; Zhang 等, 2009a, 2009c 及其参考文献; 图 12a). 从沉积相演化来看, 研究区早中二叠世沉积序列主要为海相和浅海相沉积(Eizenhöfer 和 Zhao, 2018; 朱俊宾, 2015; 图 6), 表明该时期古亚洲洋仍然存在.

第二阶段(约 285~235Ma), 古亚洲洋从西向东逐渐闭合, 构造体制从俯冲增生转变到(软)碰撞(图 12b). 此阶段初期, 仍发育俯冲末期陆缘弧岩浆作用(Li Y L 等, 2014; 刘军等, 2014; 彭云彪等, 2018; 曾俊杰等, 2008). 研究区内最古老的具有高 Sr/Y 比值特征的碰撞相关岩浆活动发生在华北克拉通北缘(本研究中二叠世阿木乌苏花岗闪长岩; 柳长峰等, 2010a; Zeng 等, 2012). 然而, 增厚下地壳源区的高 Sr/Y 比花岗岩类沿缝合带在西段出现较早(264~256Ma; 柳长峰等, 2011), 而在东段出现较晚(251~245Ma; Li 等, 2017), 表明西段碰撞早于东段, 且碰撞过程导致的地壳加厚可能一直延续到中三叠世末期(Yuan 和 Zhang, 2018). 在此期间, 华北克拉通北缘也处于南北向的挤压构造环境中: 表现为前寒武纪结晶基底抬升; 东西走向、南倾的褶皱和韧性剪切带的形成(Wang 等, 2013; Xiao 等, 2015). 另外, 位于北部造山带和缝合带内的晚古生代-早中生代中级 P/T 相蓝片岩也与缝合带两侧块体碰撞有关(Zhang 等, 2016). 晚二叠世早期, 一些分布在华北克拉通北缘和索伦-西拉木伦缝合带内的花岗质岩体发生了不同程度的变形, 具糜棱构造(图 6; 李锦轶等, 2007; Li Y L 等, 2014; Lin 等, 2013; Zhang 等, 2009c), 也可能与两侧地体的汇聚碰撞作用有关. 从沉积记录上看, 在中二叠世, 北部造山带和索伦-西拉木伦缝合带以浅海相沉积

图 11 中亚造山带东南缘二叠纪至三叠纪花岗岩类主要地球化学特征

(a) Sr/Y比Y埃达克岩判别图解, 改自Richards和Kerrick(2007). (b) 图(a)中落入埃达克岩范围内花岗岩类MgO比SiO₂图解, 俯冲相关、拆沉相关以及加厚下地壳相关埃达克岩范围据Wang等(2006), 藏南碰撞型埃达克岩数据来自Chung等(2003). (c) Sr/Y比锆石U-Pb年龄图解. (d) K₂O/MgO比1000Ga/Al图解, 改自Whalen等(1987)

为主, 而于晚二叠世发生了海相到陆相地层的转变, 到了早-中三叠世, 则全部为河湖相和冲积扇相等陆相沉积(图6; Li S等, 2014; 朱俊宾, 2015), 即此时古亚洲洋已经闭合. 最后, 研究区内的蛇绿岩或蛇绿混杂岩主要分为两个带: 北部的二连浩特-贺根山一带(形成时代大约为350~290Ma; Jian等, 2012; Miao等, 2008)和南部的索伦-满都拉-温都尔庙-柯单山-杏树洼一带(形成时代约为280~250Ma; 刘永江等, 2019; Song等, 2015以及其中的参考文献), 其中最年轻的蛇绿岩(N-MORB型玄武岩, (246±3)Ma; Chu等, 2013)表明古亚洲洋直到二叠纪末才闭合(Fu等, 2018; Jian等, 2010; Liu等, 2020; Miao等, 2007).

前人研究指出, 晚二叠世古亚洲洋沿缝合带消失后, 两侧大陆块体(华北克拉通和西伯利亚克拉通)之间并没有发生显著的硬碰撞造山运动, 而是在在其复杂大陆边缘间发生了软碰撞的过程(Eizenhöfer和Zhao, 2018; Li等, 2016a; 任继舜等, 1999; Song等, 2015; Xiao等, 2003), 即没有大规模的跨构造单元的陆壳增厚, 只表现为沿缝合带狭窄的增厚区(Li等, 2017). 并且由于古亚洲洋双向俯冲向下的牵引力较小, 因此没有发生大陆深俯冲作用, 进而没有发生大规模的区域变质和复杂变形(Eizenhöfer和Zhao, 2018; Li等, 2016a; Xiao等, 2003). 根据上述岩浆的演化特点和区域地质特征, 我们提出沿索伦-西拉木伦缝带呈零星、线性展布的

(a) 第一阶段(约285Ma之前): 古亚洲洋双向俯冲阶段

(b) 第二阶段(约285~235Ma): 构造体制从俯冲增生向(软)碰撞转变过程

(c) 第三阶段(约235Ma之后): 后造山伸展阶段

图 12 构造-岩浆演化示意图

表示了中亚造山带东南缘沿索伦-西拉木伦缝合带从俯冲增生作用的结束、俯冲到软碰撞的过渡、到陆内汇聚造山作用和最后的造山后阶段的发展演化过程, 改自Xiao等(2015). (a) 第一阶段(约285Ma之前), 古亚洲洋双向俯冲所驱动的活动大陆边缘阶段. (b) 第二阶段(约285~235Ma), 构造体制由陆缘弧转变为华北克拉通(NCC)和南蒙古地块(SMT)的(软)碰撞及后续的陆内造山作用. (a)、(b)展示了古亚洲洋从西到东“剪刀”状闭合的过程. (c) 第三阶段(约235Ma之后), 该阶段构造背景转变为造山后伸展, 导致了造山带的垮塌

二叠纪末期至中三叠纪形成于加厚下地壳背景的具有高Sr/Y特征的花岗岩类可作为增生型造山带最终(软)碰撞的岩浆标志。

第三阶段(约235Ma之后), 发育与造山后伸展垮塌作用有关的A型花岗岩(图12c)。在第二阶段末期, 位于华北克拉通北缘约245Ma的碱性杂岩表明研究区已经开始从挤压向伸展转变(Yang等, 2012)。北部造山带苏尼特左旗地区哈拉图岩体和本研究中的苏左旗黑云母花岗岩(233~220Ma)表现出从I型花岗岩过渡到A型花岗岩的特征(Chen等, 2009; Hu等, 2015; 石玉若等, 2004), 也反映了构造环境逐渐转变为伸展背景。然而与东北地区相比(孙德等有, 2005; Wu等, 2002), 内蒙古中部的A型花岗岩相对稀少, 表明该地区三叠纪伸展作用可能比较有限。同时, 此阶段沉积岩全部为陆相沉积(湖相)(Li S等, 2014)。此外, 该时期变质核杂岩的形成和伸展盆地的发育(Wang等, 2011)以及华北克拉通及其邻近地区的岩石圈减薄(例如: Yang等, 2008)均表明了中亚造山带东南缘自晚三叠世开始进入了后造山伸展构造背景的阶段。

6 结论

本文中二叠至晚三叠世花岗岩地球化学和同位素特征呈现系统性变化, 反映了不同构造背景下的岩石成因过程, 记录了从陆缘弧到(软)碰撞, 再到碰撞后伸展的构造-岩浆演化。结合区域地质资料, 我们进一步确认了沿索伦-西拉木伦缝合带呈零星、线性展布的二叠纪末至中三叠世加厚下地壳源区的高Sr/Y特征的花岗岩类为中亚造山带东南缘最终发生(软)碰撞的岩浆标志。此外, 俯冲增生到碰撞拼合转换阶段, 沿缝合带从西(约264Ma)向东(约251Ma)的花岗岩类年龄峰期的变化与“剪刀”状闭合的构造背景一致。进而, 根据研究区花岗岩类的时空分布、地球化学和同位素的演变规律, 我们提出了三阶段构造-岩浆演化过程。(1) 早二叠世(约285Ma之前): 古亚洲洋最后双向俯冲阶段, 发育新生弧岩浆作用; (2) 中二叠世至中三叠世(约285~235Ma): 从俯冲增生到(软)碰撞的构造转变阶段, 此时古老陆壳组分的贡献增多; (3) 晚三叠世(约230Ma之后): 造山后伸展垮塌作用阶段, 发育A型花岗岩。

致谢 感谢董云鹏教授和两名匿名审稿人对本文的建设性意见, 使本文得以完善。此工作是对国际地学计划(IGCP662)的贡献。

参考文献

- 陈斌, 赵国春, Wilde S A. 2001. 内蒙古苏尼特左旗南两类花岗岩同位素年代学及其构造意义. 地质论评, 47: 361-367
- 晨辰, 张志诚, 郭召杰, 李建锋, 冯志硕, 汤文豪. 2012. 内蒙古达茂旗满都拉地区早二叠世基性岩的年代学、地球化学及其地质意义. 中国科学: 地球科学, 55: 39-52
- 樊航宇, 李明辰, 张全, 黄猛, 张晓飞, 李继军. 2014. 内蒙古西乌旗地区大石寨组火山岩时代及地球化学特征. 地质通报, 33: 1284-1292
- 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎峰, 王凯怡, 刘勇胜. 2009. 内蒙古白云鄂博地区晚古生代闪长质-花岗质岩石年代学框架及其地质意义. 岩石学报, 25: 2933-2938
- 关庆彬, 刘正宏, 白新会, 李鹏川, 万乐, 李世超. 2016. 内蒙古巴林右旗新开坝地区大石寨组火山岩形成时代及构造背景. 岩石学报, 32: 2029-2040
- 李斌, 陈井胜, 刘淼, 杨帆, 李伟, 吴振, 陈敏华, 武昌胜. 2018. 内蒙古赤峰地区早二叠世花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及地球化学特征. 地质通报, 37: 1671-1681
- 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 李亚萍, 王彦斌. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束. 岩石学报, 23: 565-582
- 李可, 张志诚, 冯志硕, 李建锋, 汤文豪, 罗志文. 2014. 内蒙古中部巴彦乌拉地区晚石炭世-早二叠世火山岩锆石SHRIMP U-Pb定年及其地质意义. 岩石学报, 30: 2041-2054
- 柳长峰, 杨帅师, 武将伟, 张华锋. 2010a. 内蒙古中部四子王旗地区晚二叠-早三叠世过铝质花岗岩定年及成因. 地质学报, 84: 1002-1016
- 柳长峰, 张浩然, 於扬森, 周志广, 刘文灿, 张华锋. 2010b. 内蒙古中部四子王旗地区北极各岩体锆石定年及其岩石化学特征. 现代地质, 24: 112-119
- 柳长峰, 周志广, 张华锋, 刘文灿, 张磊. 2011. 内蒙古四子王旗乌拉塔高勒庙岩体的侵位时代及岩石地球化学特征. 矿物岩石, 31: 34-43
- 刘建峰, 李锦轶, 孙立新, 殷东方, 郑培玺. 2016. 内蒙古巴林左旗九井子蛇绿岩锆石U-Pb定年: 对西拉木伦河缝合带形成演化的约束. 中国地质, 43: 1947-1962
- 刘军, 武广, 李铁刚, 王国瑞, 吴昊. 2014. 内蒙古镶黄旗哈达庙地区晚古生代中酸性侵入岩的年代学、地球化学、Sr-Nd同位素组成及其地质意义. 岩石学报, 30: 95-108
- 刘永江, 冯志强, 蒋立伟, 金巍, 李伟民, 关庆彬, 温泉波, 梁琛岳. 2019. 中国东北地区蛇绿岩. 岩石学报, 35: 3017-3047

- 毛德宝, 陈志宏, 钟长汀, 左义成, 石森, 胡小蝶. 2003. 冀北北岔沟门地区中生代侵入岩地质年代学和地球化学特征研究. *岩石学报*, 19: 661–674
- 孟庆鹏, 贺元凯, 张文, 吴泰然, 郑荣国, 徐操, 张昭昱. 2013. 华北板块北缘古大洋闭合时间的限定——来自四子王旗西后壕子同碰撞花岗岩的证据. *地质通报*, 32: 1749–1759
- 彭云彪, 蒋孝君, 剡鹏兵, 戴明建, 邢亚杰. 2018. 内蒙古正镶白旗中二叠世花岗岩锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄、地球化学特征及构造意义. *地质论评*, 64: 1379–1392
- 卿敏, 唐明国, 葛良胜, 韩先菊, 冯建兵, 袁士松, 赵玉锁. 2012. 内蒙古苏右旗毕力赫金矿区安山岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄、元素地球化学特征及其形成的构造环境. *岩石学报*, 28: 514–524
- 任继舜, 牛宝贵, 刘志刚. 1999. 软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合作用. *地学前缘*, 6: 85–93
- 石玉若, 刘敦一, 张旗, 简平, 张富勤, 苗来成, 施光海, 张履桥, 陶华. 2004. 内蒙古苏左旗地区闪长-花岗岩类SHRIMP年代学. *地质学报*, 78: 769–799
- 孙德有, 吴福元, 高山, 路孝平. 2005. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质A型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约. *地学前缘*, 12: 263–275
- 王成文, 金巍, 张兴洲, 马志红, 迟效国, 刘永江, 李宁. 2009. 东北及邻区晚古生代大地构造属性新认识. *地层学杂志*, 32: 119–136
- 王炎阳, 徐备, 程胜东, 廖闻, 邵军, 汪岩. 2014. 内蒙古克什克腾旗五道石门基性火山岩锆石U-Pb年龄及其地质意义. *岩石学报*, 30: 2055–2062
- 曾俊杰, 郑有业, 齐建宏, 代芳华, 张刚阳, 庞迎春, 武彬. 2008. 内蒙古固阳地区埃达克质花岗岩的发现及其地质意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 33: 755–763
- 张连昌, 英基丰, 陈志广, 吴华英, 王非, 周新华. 2008. 大兴安岭南段三叠纪基性火山岩时代与构造环境. *岩石学报*, 24: 911–920
- 张拴宏, 赵越, 刘建民, 胡健民, 宋彪, 刘健, 吴海. 2010. 华北地块北缘晚古生代-早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景. *岩石矿物学杂志*, 29: 824–842
- 张维, 简平, 刘敦一, 侯可军. 2010. 内蒙古中部达茂旗地区三叠纪花岗岩和钾玄岩的地球化学、年代学和Hf同位素特征. *地质通报*, 29: 821–832
- 章永梅, 张华锋, 刘文灿, 周志广. 2009. 内蒙古中部四子王旗大庙岩体时代及成因. *岩石学报*, 25: 3165–3181
- 赵英利, 李伟民, 温泉波, 梁琛岳, 冯志强, 周建平, 申亮. 2016. 内蒙古东部晚古生代构造格局: 来自中、晚二叠-早三叠世砂岩碎屑锆石U-Pb年代学的证据. *岩石学报*, 32: 2807–2822
- 朱俊宾. 2015. 内蒙古东南部上石炭统-下三叠统的沉积环境和构造背景. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京). 23–26
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chem Geol*, 192: 59–79
- Briqueu L, Bougault H, Joron J L. 1984. Quantification of Nb, Ta, Ti and V anomalies in magmas associated with subduction zones: Petrogenetic implications. *Earth Planet Sci Lett*, 68: 297–308
- Burke K. 2011. Plate tectonics, the Wilson cycle, and mantle plumes: Geodynamics from the top. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 39: 1–29
- Cawood P A, Kröner A, Collins W J, Kusky T M, Mooney W D, Windley B F. 2009. Accretionary orogens through Earth history. *Geol Soc London Spec Publ*, 318: 1–36
- Cawood P A, Pisarevsky S A, Leitch E C. 2011. Unraveling the New England orocline, east Gondwana accretionary margin. *Tectonics*, 30: TC5002
- Chen B, Jahn B M, Tian W. 2009. Evolution of the Solonker suture zone: Constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction- and collision-related magmas and forearc sediments. *J Asian Earth Sci*, 34: 245–257
- Chen B, Jahn B M, Wilde S A, Xu B. 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications. *Tectonophysics*, 328: 157–182
- Chu H, Zhang J R, Wei C J, Wang H C, Ren Y W. 2013. A new interpretation of the tectonic setting and age of meta-basic volcanics in the Ondor Sum Group, Inner Mongolia. *Chin Sci Bull*, 58: 3580–3587
- Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, Nesbitt R W, Boella R M, Milton J A, German C R, Bayon G, Burton K. 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections. *J Anal At Spectrom*, 17: 1567–1574
- Chung S L, Liu D, Ji J, Chu M F, Lee H Y, Wen D J, Lo C H, Lee T Y, Qian Q, Zhang Q. 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. *Geology*, 31: 1021–1024
- Collins W J, Richards S W. 2008. Geodynamic significance of S-type granites in circum-Pacific orogens. *Geology*, 36: 559–562
- Dewey J F. 2005. Orogeny can be very short. *Proc Natl Acad Sci USA*, 102: 15286–15293
- Eizenhöfer P R, Zhao G C. 2018. Solonker Suture in East Asia and its bearing on the final closure of the eastern segment of the Palaeo-Asian Ocean. *Earth-Sci Rev*, 186: 153–172
- Eizenhöfer P R, Zhao G C, Sun M, Zhang J, Han Y G, Hou W Z. 2015. Geochronological and Hf isotopic variability of detrital zircons in Paleozoic strata across the accretionary collision zone between the North China craton and Mongolian arcs and tectonic implications. *Geol Soc Am Bull*, 127: 1422–1436
- Eizenhöfer P R, Zhao G C, Zhang J, Sun M. 2014. Final closure of the Paleo-Asian Ocean along the Solonker Suture Zone: Constraints from geochronological and geochemical data of Permian volcanic

- and sedimentary rocks. *Tectonics*, 33: 441–463
- Frost B R, Frost C D. 2008. A geochemical classification for feldspathic igneous rocks. *J Petrol*, 49: 1955–1969
- Fu D, Huang B, Kusky T M, Li G Z, Wilde S A, Zhou W X, Yu Y. 2018. A Middle Permian ophiolitic mélange belt in the Solonker suture zone, western Inner Mongolia, China: Implications for the evolution of the Paleo-Asian Ocean. *Tectonics*, 37: 1292–1320
- Hu C S, Li W B, Xu C, Zhong R C, Zhu F. 2015. Geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotopes of the granitoids of Baolidao and Halatu plutons in Sonidzuoqi area, Inner Mongolia: Implications for petrogenesis and geodynamic setting. *J Asian Earth Sci*, 97: 294–306
- Huang B C, Yan Y G, Piper J D A, Zhang D H, Yi Z Y, Yu S, Zhou T H. 2018. Paleomagnetic constraints on the paleogeography of the East Asian blocks during Late Paleozoic and Early Mesozoic times. *Earth-Sci Rev*, 186: 8–36
- Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can J Earth Sci*, 8: 523–548
- Jahn B M, Wu F Y, Chen B. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Earth Environ Sci Trans R Soc Edinburgh*, 91: 181–193
- Jian P, Kröner A, Windley B F, Shi Y R, Zhang W, Zhang L Q, Yang W R. 2012. Carboniferous and Cretaceous mafic-ultramafic massifs in Inner Mongolia (China): A SHRIMP zircon and geochemical study of the previously presumed integral “Hegenshan ophiolite”. *Lithos*, 142–143: 48–66
- Jian P, Liu D Y, Kröner A, Windley B F, Shi Y R, Zhang F Q, Shi G H, Miao L C, Zhang W, Zhang Q, Zhang L Q, Ren J S. 2008. Time scale of an early to mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China: Implications for continental growth. *Lithos*, 101: 233–259
- Jian P, Liu D Y, Kröner A, Windley B F, Shi Y R, Zhang W, Zhang F Q, Miao L C, Zhang L Q, Tomurhuu D. 2010. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia. *Lithos*, 118: 169–190
- Li S, Chung S L, Wilde S A, Jahn B M, Xiao W J, Wang T, Guo Q Q. 2017. Early-Middle Triassic high Sr/Y granitoids in the southern Central Asian Orogenic Belt: Implications for ocean closure in accretionary orogens. *J Geophys Res Solid Earth*, 122: 2291–2309
- Li S, Chung S L, Wilde S A, Wang T, Xiao W J, Guo Q Q. 2016a. Linking magmatism with collision in an accretionary orogen. *Sci Rep*, 6: 25751
- Li S, Wilde S A, He Z J, Jiang X J, Liu R Y, Zhao L. 2014. Triassic sedimentation and postaccretionary crustal evolution along the Solonker suture zone in Inner Mongolia, China. *Tectonics*, 33: 960–981
- Li S, Wilde S A, Wang T, Xiao W J, Guo Q Q. 2016b. Latest Early Permian granitic magmatism in southern Inner Mongolia, China: Implications for the tectonic evolution of the southeastern Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Res*, 29: 168–180
- Li Y L, Zhou H W, Brouwer F M, Xiao W J, Wijbrans J R, Zhong Z Q. 2014. Early Paleozoic to Middle Triassic bivergent accretion in the Central Asian Orogenic Belt: Insights from zircon U-Pb dating of ductile shear zones in central Inner Mongolia, China. *Lithos*, 205: 84–111
- Lin S Z, Zhu G, Yan L J, Song L H, Liu B. 2013. Structural and chronological constraints on a Late Paleozoic shortening event in the Yanshan Tectonic Belt. *Chin Sci Bull*, 58: 3922–3936
- Liu H C, Wang J C, Lai C K, Li Y L, Wang J F, Song C Y, Zhang J D, Zhao X, Qin J D. 2020. Anatomy of two Permian greenschist- to blueschist-facies tectonic mélanges in the Solonker Suture Zone (Inner Mongolia, northeastern China): Evidence for divergent double subduction and soft collision. *J Geol Soc*, 177: 981–996
- Liu J F, Li J Y, Chi X G, Qu J F, Hu Z C, Fang S, Zhang Z. 2013. A late-Carboniferous to early early-Permian subduction-accretion complex in Daqing pasture, southeastern Inner Mongolia: Evidence of northward subduction beneath the Siberian paleoplate southern margin. *Lithos*, 177: 285–296
- Liu Y S, Wang X H, Wang D B, He D T, Zong K Q, Gao C G, Hu Z C, Gong H J. 2012. Triassic high-Mg adakitic andesites from Linxi, Inner Mongolia: Insights into the fate of the Paleo-Asian ocean crust and fossil slab-derived melt-peridotite interaction. *Chem Geol*, 328: 89–108
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3.0: A Gochronological Toolkit for Microsoft Excel. California: Berkeley Geochronology Center
- Miao L C, Fan W M, Liu D Y, Zhang F Q, Shi Y R, Guo F. 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: Implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China. *J Asian Earth Sci*, 32: 348–370
- Miao L C, Zhang F, Fan W M, Liu D Y. 2007. Phanerozoic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling orogenic belt in North China: Constraints from geochronology of ophiolites and associated formations. *Geol Soc London Spec Publ*, 280: 223–237
- Norrish K, Hutton J T. 1969. An accurate X-ray spectrographic method for the analysis of a wide range of geological samples. *Geochim Cosmochim Acta*, 33: 431–453
- Liang Q L, Grégoire D C. 2000. Determination of trace elements in twenty six Chinese geochemistry reference materials by inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards Geoanal Res*, 24:

51–63

- Ren Q, Zhang S H, Gao Y J, Zhao H Q, Wu H C, Yang T S, Li H Y. 2020. New middle-late permian paleomagnetic and geochronological results from Inner Mongolia and their paleogeographic implications. *J Geophys Res Solid Earth*, 125: e19114
- Richards J P, Kerrich R. 2007. Special paper: Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Econ Geol*, 102: 537–576
- Saunders A D, Jones S M, Morgan L A, Pierce K L, Widdowson M, Xu Y G. 2007. Regional uplift associated with continental large igneous provinces: The roles of mantle plumes and the lithosphere. *Chem Geol*, 241: 282–318
- Schulmann K, Paterson S. 2011. Asian continental growth. *Nat Geosci*, 4: 827–829
- Sengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299–307
- Shi G R. 2006. The marine Permian of east and northeast Asia: An overview of biostratigraphy, palaeobiogeography and palaeogeographical implications. *J Asian Earth Sci*, 26: 175–206
- Shi Y R, Jian P, Kröner A, Li L L, Liu C, Zhang W. 2016. Zircon ages and Hf isotopic compositions of Ordovician and Carboniferous granitoids from central Inner Mongolia and their significance for early and late Paleozoic evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *J Asian Earth Sci*, 117: 153–169
- Song S G, Wang M M, Xu X, Wang C, Niu Y L, Allen M B, Su L. 2015. Ophiolites in the Xing'an-Inner Mongolia accretionary belt of the CAOB: Implications for two cycles of seafloor spreading and accretionary orogenic events. *Tectonics*, 34: 2221–2248
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geol Soc London Spec Publ*, 42: 313–345
- Tian D X, Yang H, Ge W C, Zhang Y L, Chen J S, Chen H J, Yun X Y. 2018. Petrogenesis and tectonic implications of Late Carboniferous continental arc high-K granites in the Dongwuqi area, central Inner Mongolia, North China. *J Asian Earth Sci*, 167: 82–102
- Wang Q, Xu J F, Jian P, Bao Z W, Zhao Z H, Li C F, Xiong X L, Ma J L. 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, south China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *J Petrol*, 47: 119–144
- Wang T, Zheng Y D, Zhang J J, Zeng L S, Donskaya T, Guo L, Li J B. 2011. Pattern and kinematic polarity of Late Mesozoic extension in continental NE Asia: Perspectives from metamorphic core complexes. *Tectonics*, 30: TC6007
- Wang Y, Zhou L Y, Zhao L J. 2013. Cratonic reactivation and orogeny: An example from the northern margin of the North China Craton. *Gondwana Res*, 24: 1203–1222
- Wei R H, Gao Y F, Xu S C, Santosh M, Xin H T, Zhang Z M, Li W L, Liu Y F. 2018. Carboniferous continental arc in the Hegenshan accretionary belt: Constrains from plutonic complex in central Inner Mongolia. *Lithos*, 308–309: 242–261
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib Mineral Petrol*, 95: 407–419
- Windley B F, Alexeev D, Xiao W J, Kröner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the central Asian orogenic belt. *J Geol Soc*, 164: 31–47
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, Zhang Y B, Grant M L, Wilde S A, Jahn B M. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in north-eastern China. *J Asian Earth Sci*, 41: 1–30
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, Jahn B M, Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chem Geol*, 187: 143–173
- Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, Zhang X O. 2005. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. *Chem Geol*, 221: 127–156
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, Yang J H, Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chem Geol*, 234: 105–126
- Xiao W J, Windley B F, Han C M, Liu W, Wan B, Zhang J E, Ao S J, Zhang Z Y, Song D. 2018. Late Paleozoic to early Triassic multiple roll-back and oroclinal bending of the Mongolia collage in Central Asia. *Earth-Sci Rev*, 186: 94–128
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, Zhai M G. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22: 1069
- Xiao W J, Windley B F, Huang B C, Han C M, Yuan C, Chen H L, Sun M, Sun S, Li J L. 2009. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia. *Int J Earth Sci-Geol Rundsch*, 98: 1189–1217
- Xiao W J, Windley B F, Sun S, Li J L, Huang B C, Han C M, Yuan C, Sun M, Chen H L. 2015. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in Central Asia: Oroclines, sutures, and terminal accretion. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 43: 477–507
- Xu B, Charvet J, Chen Y, Zhao P, Shi G Z. 2013. Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia (China): Framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Res*, 23: 1342–1364
- Yang J H, Sun J F, Zhang M, Wu F Y, Wilde S A. 2012. Petrogenesis of

- silica-saturated and silica-undersaturated syenites in the northern North China Craton related to post-collisional and intraplate extension. *Chem Geol*, 328: 149–167
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Belousova E, Griffin W L. 2008. Mesozoic decratonization of the North China block. *Geology*, 36: 467–470
- Yuan L L, Zhang X, Xue F, Liu F. 2016. Juvenile crustal recycling in an accretionary orogen: Insights from contrasting Early Permian granites from central Inner Mongolia, North China. *Lithos*, 264: 524–539
- Yuan L L, Zhang X H. 2018. Petrogenesis of the Middle Triassic Erenhot granitoid batholith in central Inner Mongolia (northern China) with tectonic implication for the Triassic Mo mineralization in the eastern Central Asian Orogenic Belt. *J Asian Earth Sci*, 165: 37–58
- Zeng Q D, Yang J H, Liu J M, Chu S X, Duan X X, Zhang Z L, Zhang W Q, Zhang S. 2012. Genesis of the Chehugou Mo-bearing granitic complex on the northern margin of the North China Craton: Geochemistry, zircon U-Pb age and Sr-Nd-Pb isotopes. *Geol Mag*, 149: 753–767
- Zhai M G, Santosh M. 2011. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. *Gondwana Res*, 20: 6–25
- Zhang J R, Wei C J, Chu H. 2016. Blueschist metamorphism and its tectonic implication of Late Paleozoic-Early Mesozoic metabasites in the mélange zones, central Inner Mongolia, China. *J Asian Earth Sci*, 97: 352–364
- Zhang S H, Gao R, Li H Y, Hou H S, Wu H C, Li Q S, Yang K, Li C, Li W H, Zhang J S, Yang T S, Keller G R, Liu M. 2014. Crustal structures revealed from a deep seismic reflection profile across the Solonker suture zone of the Central Asian Orogenic Belt, northern China: An integrated interpretation. *Tectonophysics*, 612–613: 26–39
- Zhang S H, Zhao Y, Davis G A, Ye H, Wu F. 2014a. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization. *Earth-Sci Rev*, 131: 49–87
- Zhang S H, Zhao Y, Kröner A, Liu X M, Xie L W, Chen F K. 2009a. Early Permian plutons from the northern North China Block: Constraints on continental arc evolution and convergent margin magmatism related to the Central Asian Orogenic Belt. *Int J Earth Sci-Geol Rundsch*, 98: 1441–1467
- Zhang S H, Zhao Y, Liu X C, Liu D Y, Chen F K, Xie L W, Chen H H. 2009b. Late Paleozoic to Early Mesozoic mafic-ultramafic complexes from the northern North China Block: Constraints on the composition and evolution of the lithospheric mantle. *Lithos*, 110: 229–246
- Zhang S H, Zhao Y, Song B, Hu J M, Liu S W, Yang Y H, Chen F K, Liu X M, Liu J. 2009c. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China Craton: Geochronology, petrogenesis, and tectonic implications. *Geol Soc Am Bull*, 121: 181–200
- Zhang S H, Zhao Y, Ye H, Liu J M, Hu Z C. 2014b. Origin and evolution of the Bainaimiao arc belt: Implications for crustal growth in the southern Central Asian orogenic belt. *Geol Soc Am Bull*, 126: 1275–1300
- Zhang X H, Mao Q, Zhang H F, Zhai M G, Yang Y H, Hu Z C. 2011. Mafic and felsic magma interaction during the construction of high-K calc-alkaline plutons within a metacratonic passive margin: The Early Permian Guyang batholith from the northern North China Craton. *Lithos*, 125: 569–591
- Zhao G C, Wang Y J, Huang B C, Dong Y P, Li S Z, Zhang G W, Yu S. 2018. Geological reconstructions of the east Asian blocks: From the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea. *Earth-Sci Rev*, 186: 262–286

(责任编辑: 董云鹏)