

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.135>



集宁地区两类古元古代重熔花岗岩的 锆石U-Pb年代学及岩石成因

常青松^{1,2}, 王惠初^{1,2}, 施建荣^{1,2}, 任云伟^{1,2}

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

2. 中国地质调查局前寒武纪地质研究中心, 天津 300170

摘要: 学术界对集宁—凉城地区的古元古代重熔型花岗岩成因一直持有不同的解释, 本文对集宁土贵乌拉—隆盛庄一带两类重熔花岗岩进行了同位素年代学及地球化学研究。锆石LA-MC-ICP-MS U-Pb年代学结果显示, 斑状石榴紫苏二长花岗质片麻岩具有1954 Ma的侵位年龄及1827 Ma的变质年龄, 变质淡色石榴二长花岗岩具有1956 Ma的侵位年龄。岩石地球化学特征显示斑状石榴紫苏二长花岗质片麻岩低硅、高镁铁, 具有Eu负异常及Sr的相对亏损; 变质淡色石榴二长花岗岩富硅、贫铁镁, 强烈亏损Nb、Ta、Ti等高场强元素, 富集K和Rb、Ba等亲石元素。二者形成时代相同, 可能源自幔源岩浆底侵造成的重熔, 斑状石榴紫苏二长花岗质片麻岩源岩为孔兹岩系沉积岩, 混合了一定比例的幔源物质组分并经过分离结晶过程; 变质淡色石榴二长花岗岩源岩主要为孔兹岩系沉积岩, 较少受到幔源组分的影响。

关键词: 重熔花岗岩; 古元古代; 锆石U-Pb年代学; 地球化学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2020)09-3258-10

收稿日期: 2020-04-02

Zircon U-Pb Chronology and Petrogenesis of Two Types of Remelting Granite in Jining Area

常青松^{1,2}, 王惠初^{1,2}, 施建荣^{1,2}, 任云伟^{1,2}

1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

2. Pre-Cambrian Geological Research Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

Abstract: The petrogenesis of Paleoproterozoic remelting granite in Jining-Liangcheng area has been interpreted differently in academia. Geochronologic and geochemical studies of two types of remelting granite are presented in this paper. Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb isotopic dating reveals that the porphyritic charnockites emplaced at 1954 Ma and were metamorphosed at 1827 Ma, and the meta-leucogranites emplaced at 1956 Ma. The porphyritic charnockites are characterized by low Si contents, high Fe and Mg contents, with negative Eu anomalies and relative depletion of Sr. The meta-leucogranites have high content of Si and low contents of Fe and Mg, strong depletion in high field-strength elements (HFSE, such as Nb, Ta and Ti) and enrichment in large iron lithophile elements (LILE, such as K, Rb and Ba). Both two types of granite were generated in the same period, from the remelting associated with mantle-source magma underplating. The source magma of the porphyritic charnockites was mixed with certain amount of mantle contribution during remelting of meta-sediments of khondalite series, before fractional crystallization. And the source magma of the meta-leucogranites was generated mainly from remelting of meta-sediments of khondalite series, with limited influence of mantle contribution.

Key words: remelting granite; Paleoproterozoic; zircon U-Pb chronology; geochemistry.

基金项目: 中国地质调查局地质调查二级项目(Nos.DD20160042, DD20190035)。

作者简介: 常青松(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事岩石学及地球化学研究。ORCID:0000-0003-1979-2012. E-mail:ga_8ief7@163.com

引用格式: 常青松, 王惠初, 施建荣, 等, 2020. 集宁地区两类古元古代重熔花岗岩的锆石U-Pb年代学及岩石成因. 地球科学, 45(9):3258—3267.

0 引言

凉城—集宁一带位于华北地台北缘中西部,该地区为孔兹岩系集中出露地区,并大量发育古元古代S型重熔花岗岩(图1a),岩性包括变质闪长岩、变质石英闪长岩、变质二长花岗岩、淡色花岗岩等,较为著名的有徐武家斑状紫苏花岗岩(Peng *et al.*, 2012b)、和林格尔—凉城石榴石花岗岩类(罗志波等,2012;张华锋等,2013;陈海东等,2016;张玉清等,2016)及土贵乌拉—凉城淡色石榴花岗岩(Wang *et al.*, 2017)等。学术界普遍认为这些S型花岗岩来自其相邻集宁岩群孔兹岩系的重熔(Zhai and Liu, 2003;钟长汀等,2007;Peng *et al.*, 2010)。这些重熔型花岗岩的形成时代多在2.0~1.9 Ga之间,与华北克拉通古元古代造山作用密切相关。

关于华北克拉通古元古代造山演化,目前在学术界主要有两种解释,一种观点认为目前的华北地块先经过~1.95 Ga阴山和鄂尔多斯碰撞拼合,形成孔兹岩带,之后在~1.85 Ga东、西部地块之间的洋盆闭合碰撞形成中部造山带,并最终形成整个华北克拉通(Zhao *et al.*, 2005, 2012),而~1.8 Ga未变质基性岩墙群的出现则代表中部造山带碰撞造山后的陆内伸展(Zhao *et al.*, 1999, 2000, 2001, 2003, 2005, 2012; Kröner *et al.*, 2005, 2006; 王岳军等, 2007; Wang *et al.*, 2008)。另一观点认为华北克拉通的陆块拼合发生在新太古末期—古元古代晚期,而1.95~1.80 Ga为一个连续的构造演化过程,具体构造事件的时限可能略有不同,张家辉等(2019, 2020)在天镇地区发现了形成时代早于2.03 Ga的MORB型基性火山岩及形成于~2.03 Ga的变质石榴花岗岩,认为后者来自TTG的重熔,代表了该时期处于伸展构造体制,并且认为造山汇聚的开始时间不应早于2.03 Ga,魏春景(2018)提出2.00~1.95 Ga陆陆碰撞,地壳加厚造山,并在~1.92 Ga之后转入伸展背景;翟明国(2004, 2012)、Zhai and Santosh(2011)认为~2.7 Ga为各陆块主要的生长阶段,~2.5 Ga为各个微陆块拼合的主要时期,此时华北克拉通基本形成,并形成~2.7 Ga及~2.5 Ga两期绿岩带,2.30~1.95 Ga华北克拉通经历了裂解—汇聚过程,发育了晋豫、胶辽裂陷盆地及丰镇陆内凹陷盆地,而侵位于这一时期活动带的(变质)岩墙,结束于~1.93 Ga,可能与前罗迪尼亞(哥伦比亚)造山活动有关,随后的1.95~1.82 Ga地幔隆升,~1.9 Ga

辉长质岩浆底侵引起大青山—丰镇地区的超高温麻粒岩相变质,~1.85 Ga之后进入全区的伸展抬升,一下地壳的麻粒岩相岩石出露地表并广泛发育基性岩墙群及非造山岩浆事件(彭澎等,2004;翟明国和彭澎,2007); Peng *et al.*(2012a)则提出1.93~1.89 Ga阴山地块与怀安地块存在汇聚俯冲,~1.92 Ga洋脊俯冲导致幔源物质上涌(徐武家基性岩墙),引起区域上的超高温变质作用,并在~1.8 Ga缝合碰撞。综上,两模式的主要区别在于华北克拉通古元古代为“一次碰撞”还是“二次碰撞”,即孔兹岩系与怀安地块是一次造山事件的两个组成部分还是先后碰撞的两条造山带;~1.85 Ga的变质事件记录的是挤压碰撞还是伸展抬升过程。造山演化模式的争议使得学术界对孔兹岩带中2.0~1.9 Ga的重熔花岗岩成因存在弧后伸展、俯冲板片断离及碰撞后加厚地壳的重熔等多种解释,其具体形成时代及岩石成因研究对完善华北克拉通古元古代造山作用过程具有重要意义,本文对察哈尔右翼前旗地区侵入孔兹岩系的两类重熔花岗岩进行了野外调查、同位素年代学及岩石地球化学分析,研究结果显示其可能形成于古元古代晚期幔源基性岩浆底侵导致的地壳重熔,结合同期孔兹岩系中的超高温变质作用,共同指示该时期华北克拉通存在能够引发地幔物质上涌的俯冲板片断离或地壳拆沉背景,为华北克拉通古元古带造山演化提供制约。

1 地质背景及样品

2016年—2018年,笔者参与并负责了部分察哈尔右翼前旗地区1:5万区域地质填图调查工作,该地区位于中部带与孔兹岩带交界西侧(图1a),广泛分布古元古代孔兹岩系高级变质表壳岩,并被古元古代晚期重熔型花岗岩侵入,二者接触带附近多见混合岩化及深熔条带,部分呈现渐变接触;另有古元古代晚期变质基性岩墙侵入孔兹岩系变质表壳岩,中生代晚白垩世及新生代地层直接不整合覆盖在这些前寒武纪地质单元之上,怀安片麻岩与孔兹岩系接触界限位于研究区东侧,呈北东—南西向延伸,研究区西侧凉城—呼市一带发育大规模重熔型花岗岩,区内经历多期构造、变质作用和岩浆活动,地质构造十分复杂,是研究孔兹岩系及古元古带造山演化的经典地区(图1b)。

土贵乌拉—隆盛庄一带的详细区域地质调查工作表明,该地区的古元古代重熔型花岗岩主要分

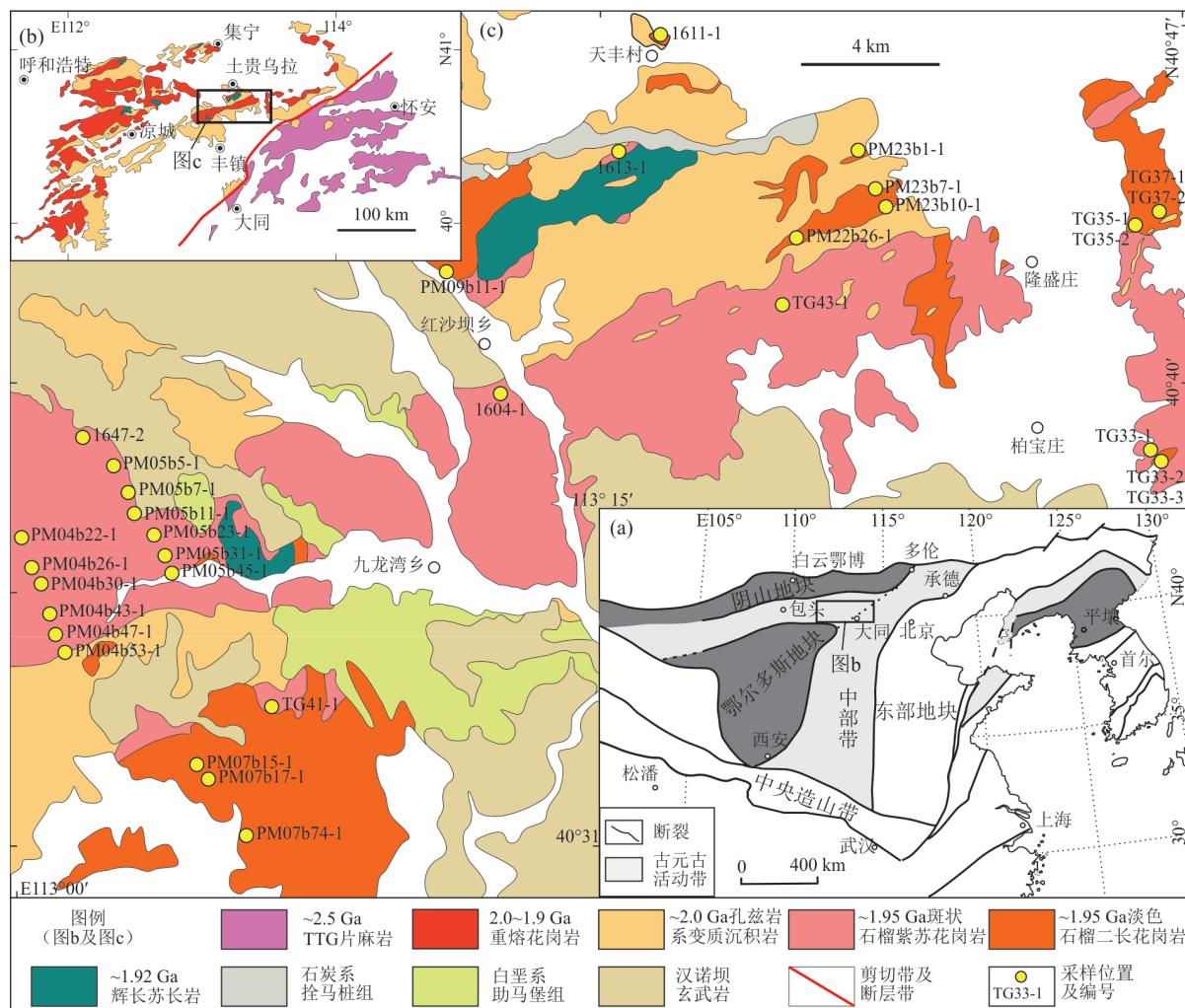


图 1 研究区地质简图

Fig.1 Regional geological sketch map of study area

a. 大地构造简图, 修改自 Zhao *et al.*(2012); b. 区域地质简图, 修改自 Guo *et al.*(2012); c. 研究区地质简图

为两个主要单元:其一为变质斑状石榴紫苏花岗岩,该单元规模较大,色率较深,以巨斑状钾长石变斑晶为特征;另一单元为规模较小,分布较为分散的变质淡色石榴花岗岩类,以下分别介绍两个单元的地质特征。

1.1 变质斑状石榴紫苏花岗岩

1:25万大同市幅区调报告将其称为变斑状石榴二长花岗岩/石英闪长岩,已发表文献中将其称为斑状紫苏花岗岩(Peng *et al.*, 2012b).该岩体出露面积约155 km²,呈北东—南西向展布,北部与南部顺层侵入孔兹岩系变质沉积岩,接触带附近发育网脉状深熔条带,见较多表壳岩残留体,部分地区与其呈渐变接触关系.该岩体与古元古代基性岩(徐武家变质辉长岩及九龙湾变质辉长苏长岩)呈现平行片麻理接触,接触界限附近变形及韧性剪切

强烈,未见清晰明确的侵入关系(图1),对岩体进行了大比例尺的剖面观察及取样(图1c),其内部在较大尺度范围内成分均匀,宏观露头呈丘状产出,野外露头的特征性外貌为巨斑钾长石变余斑晶,斑晶长轴可达5 cm或以上(图2a).岩石新鲜面呈灰色、青灰色、风化面浅肉红色及肉红色、巨斑钾长石变余斑晶为黄白色—肉红色,变余似斑状结构、岩石片麻状—块状构造,部分区域露头糜棱岩化,斑晶占比10%~40%;基质主要矿物成分为钾长石(主要为条纹长石)20%~40%、斜长石10%~40%、石榴石分布不均,多呈集合体,含量10%~15%,石英5%~20%,黑云母约10%,紫苏辉石5%~15%;副矿物见锆石、独居石、磷灰石、磁铁矿等,综合定名为变质斑状石榴紫苏二长花岗岩(图2a、2b,以下简称斑状石榴紫苏花岗岩)。

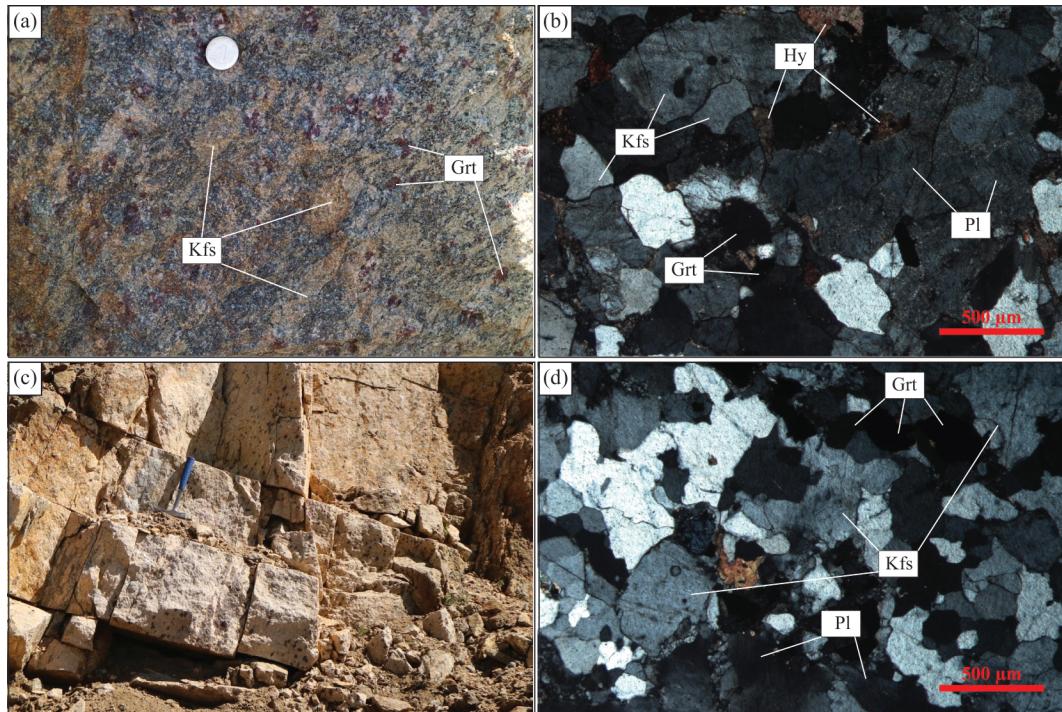


图2 野外露头及正交偏光显微照片

Fig.2 Field outcrop photograph and cross-polarized photomicrograph

a、b. 斑状石榴紫苏花岗岩;c、d. 淡色石榴二长花岗岩. 图中:Pl. 斜长石;Kfs. 钾长石(条纹长石);Hy. 紫苏辉石;Grt. 石榴石

1.2 淡色石榴二长花岗岩

主要分布在隆盛庄阳坡窑子一六十三号及五道沟—白石头山一带,新鲜面灰白色,多呈规模大小不等、不规则的丘状、岩株状、岩脉状侵入于孔兹岩系变质沉积岩中,与斑状石榴紫苏二长花岗质片麻岩呈平行片麻理接触或过渡接触,较难判断先后关系,各露头总面积约40 km²(图1). 岩石粒度较粗,变质表壳岩残留体较少(图2c),脉状产出的淡色石榴二长花岗岩通常顺孔兹岩系片麻理侵入,与变质表壳岩密切共生. 岩石呈黄白色,为变余中粗粒花岗变晶结构,块状、弱片麻状构造,暗色矿物含量较少,矿物组成主要为钾长石(主要为条纹长石)25%~60%、斜长石10%~40%、石英20%~25%、黑云母约5%、粉红—玫瑰红色石榴石1%~5%、矽线石0%~1%. 副矿物见钛铁矿+磁铁矿+锆石+独居石+白钛石+黄铁矿+赤褐铁矿+金红石+磷灰石,常见为锆石+独居石,综合岩性为变质淡色石榴二长花岗岩(图2c、2d).

2 样品制备及分析方法

本文所有同位素定年样品的锆石单矿物挑选由廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务公司完成,阴

极发光(CL)照相、制靶由北京锆年领航科技有限公司完成. 锆石同位素样品的选点原则见张永清等(2015).

样品1604-1、1611-1及1613-1的U-Pb年代学测试在天津地质调查中心实验测试室完成,进样系统为Newave 193 nm激光剥蚀系统,质谱为多接收器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS,仪器型号为Neptune),激光束斑直径为35 μm,频率8~10 Hz,同位素外标采用GJ-1,微量元素含量外标为NIST610,U-Pb同位素测试数据见附表1.

碎样在廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务公司完成,新鲜岩石样品去除风化表皮及后期长英质及碳酸岩脉体后,碎至200目粉末,全岩主量及微量元素成分由中国地质调查局天津地质调查中心实验测试室测定. 主量元素采用XRF法,测试仪器为PW4400/40X;微量元素使用ICP-MS溶液进样方法测定,测试仪器型号为Thermo X II等离子体质谱仪,主微量元素测试数据见附表2.

3 锆石U-Pb年代学

斑状石榴紫苏花岗岩样品的锆石阴极发光图像(图3a、3b)显示锆石以次浑圆粒状、柱粒状为主,少量为柱状,粒度较粗,单个锆石最大粒径多大于

100 μm , 可明显划分为核、幔两部分, 核部多呈柱状形态, 个别呈粒状, 色暗, 内部发育不太清晰的振荡环带, 显然为岩浆结晶成因, 幔部颜色较浅, 呈均匀弥散状不见环带, 并且具较低 Th/U 比值(大部分仍

大于 0.1, 但明显小于核部), 可能为高级变质作用阶段生长的变质边, 部分锆石 CL 图较亮, 无核幔结构, 具有变质新生锆石特征, 笔者对岩浆及变质新生锆石都进行了同位素测年(图 4).

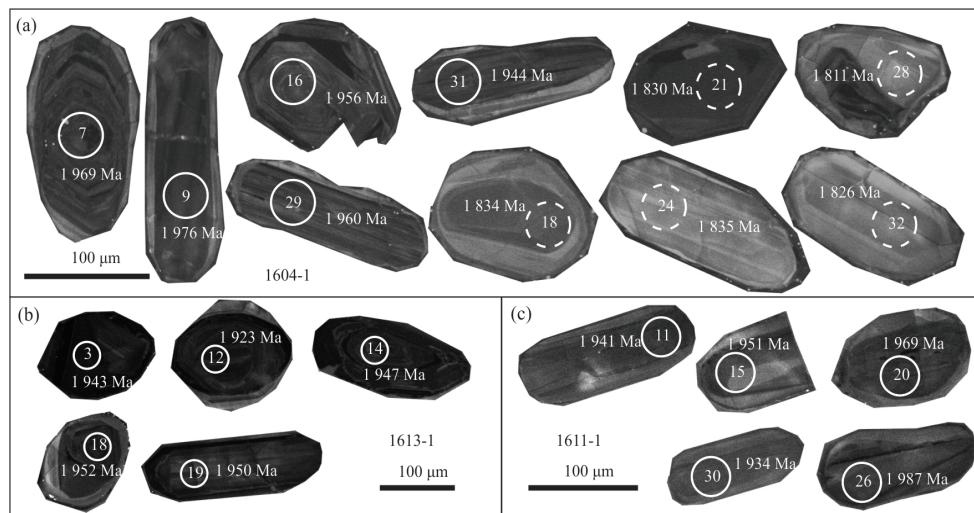


图 3 锆石阴极发光(CL)图像

Fig.3 Zircon cathode luminescence (CL) images
虚线圆圈为变质年龄点位; 实线圆圈为岩浆年龄点位

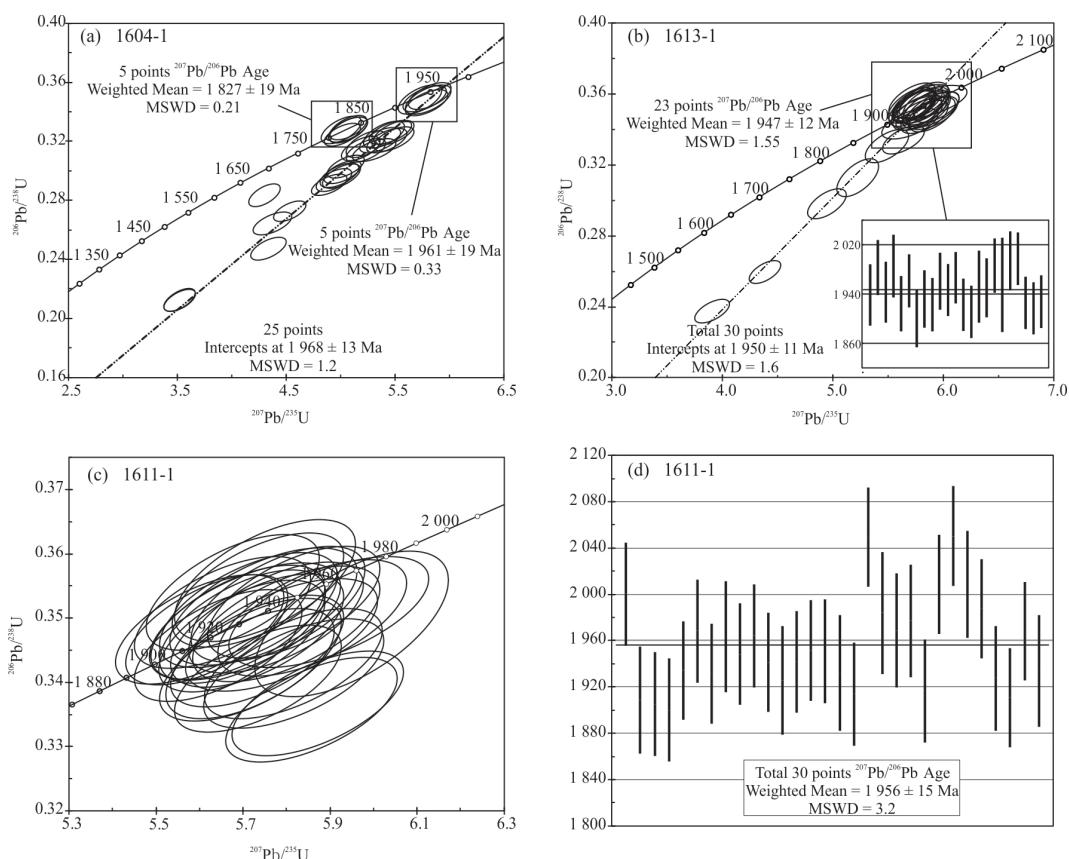


图 4 锆石 U-Pb 谙和图

Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagrams

样品1604-1共获得32个测点,剔除一个既不在谐和线附近,也无法与其他锆石形成交点年龄的测点(03号),其余31个测点中,25个岩浆锆石点形成了 1968 ± 13 Ma的上交点年龄,交点附近谐和线上5个测点形成 1961 ± 19 Ma的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄,变质锆石中5个在谐和线上的点形成了 1827 ± 19 Ma的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄(图4a).样品1613-1获得的全部30个岩浆锆石测点形成了 1950 ± 11 Ma的上交点年龄,其中23个谐和线附近的测点获得了 1947 ± 12 Ma的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄(图4b).两个样品的上交点年龄及加权平均年龄在误差范围内一致,本文综合采用二者 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权年龄的平均值1954 Ma作为斑状石榴紫苏花岗岩的侵位年龄.

淡色石榴二长花岗岩的锆石阴极发光图像(图3c)显示锆石形态多呈柱状,个别呈浑圆粒状,平均粒度较斑状石榴紫苏花岗片麻岩锆石更小,色较暗,具有核幔结构;核部发育环带,一般颜色较深;边部较窄,结构不清晰,颜色较浅,较少见到颜色发亮的变质新生锆石,所有锆石的Th/U均大于0.1.样品1611-1获得30个岩浆锆石测点,结果较为集中,且均在谐和线附近(图4c),本文取其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 1956 ± 15 Ma作为侵位年龄(图4d).

4 岩石地球化学

4.1 斑状石榴紫苏花岗岩

斑状石榴紫苏花岗岩19件样品 $\text{SiO}_2=58.99\% \sim 69.78\%$,平均 63.71% , $\text{Na}_2\text{O}=1.90\% \sim 2.84\%$,平均 2.45% . $\text{K}_2\text{O}=0.78\% \sim 6.04\%$,平均

3.56% ,变化较大但整体含量较高,TAS对应石英闪长岩—石英二长岩—花岗闪长岩类(图5a).富铝(Al_2O_3 平均 16.71%), $\text{A/CNK}=1.02 \sim 1.68$,平均 1.2 ; $\text{MgO}=1.65\% \sim 3.65\%$,平均为 2.41% ; $\text{Mg}^{\#}=38 \sim 52$; $\text{TFeO}=4.38\% \sim 9.43\%$;整体低硅、富铝富钾、高镁铁,属过铝质系列;长石An-Ab-Or判别图解中主要落入花岗闪长岩—石英二长岩区域(图5b),与TAS判别相符.

19件样品样品 ΣREE 平均 355.67×10^{-6} ,含量偏高, La/Yb 平均 44.39 , La/Sm 平均 4.40 ,轻重稀土分异程度较高,重稀土含量较低且配分图解中较平坦,指示结晶相中有石榴石不同程度残留,具Eu负异常(图6a),原始地幔标准化微量元素蜘蛛图解显示了从不相容元素到相容元素富集程度降低的趋势,Nb、Ta、P、Ti等高场强元素出现相对亏损,Th、K、Pb等亲石元素出现相对富集,Sr则出现较低程度的相对亏损(图6b).

4.2 淡色石榴二长花岗岩

淡色石榴二长花岗岩 $\text{SiO}_2=69.74\% \sim 75.36\%$,平均 73.47% , $\text{Na}_2\text{O}=2.06\% \sim 5.33\%$,平均 3.66% . $\text{K}_2\text{O}=1.85\% \sim 8.09\%$,平均 4.93% ;TAS落入花岗岩区域(图5a).富铝($\text{Al}_2\text{O}_3=13.54\% \sim 16.55\%$, $\text{A/CNK}=1.09 \sim 1.18$).相对贫镁($\text{MgO}=0.09\% \sim 0.62\%$, $\text{Mg}^{\#}=26 \sim 47$),贫铁($\text{TFeO}=0.18\% \sim 1.38\%$);岩石整体富硅、高钠钾、贫铁镁,属过铝质系列,长石An-Ab-Or判别图解中主要落入花岗岩区域,少数落入更长花岗岩区域,与TAS判别相符.

15件样品稀土含量较斑状石榴紫苏二长花岗岩片麻岩偏低(ΣREE 平均 77.48×10^{-6}), La/Yb 平

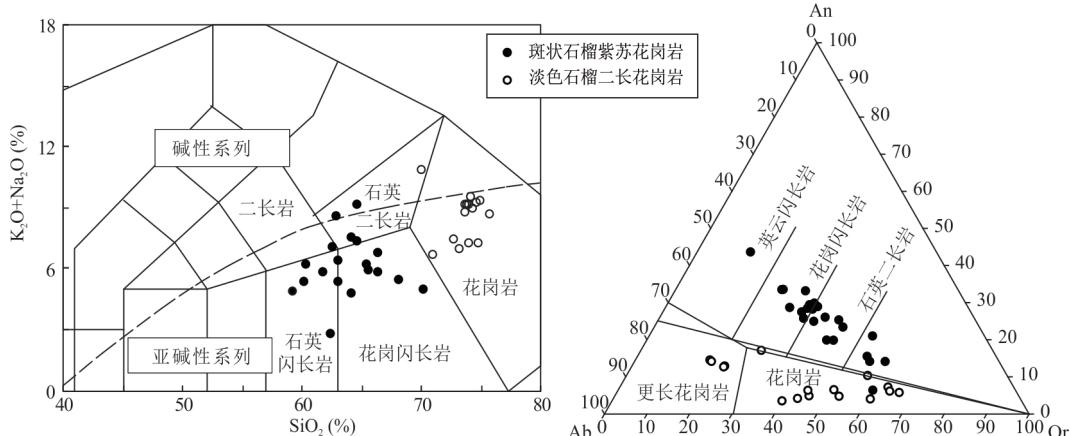


图5 岩浆岩TAS判别图解(a)及An-Ab-Or判别图解(b)

Fig.5 TAS diagram (a) and An-Ab-Or diagram (b)

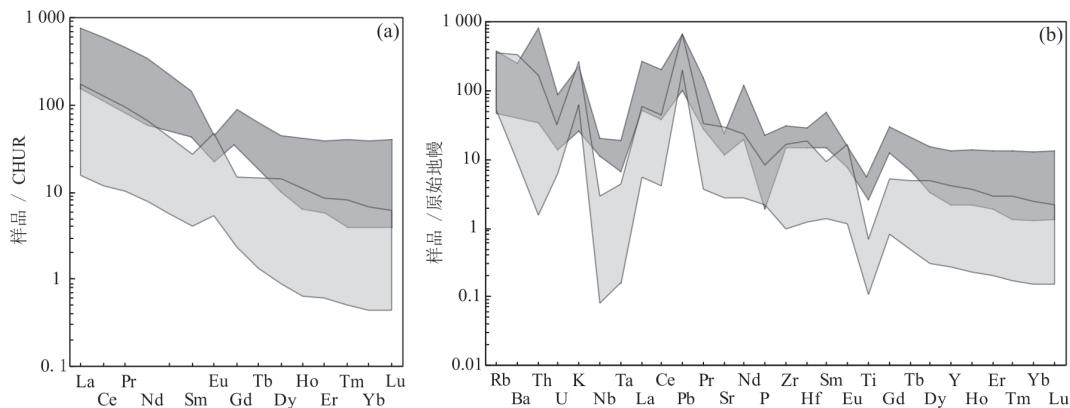


图 6 球粒陨石标准化稀土配分图解(a)及原始地幔标准化微量元素蜘蛛图解(b)

Fig.6 CHUR normalized REE distribution diagrams (a) and primitive mantle normalized spider diagrams (b)

深灰色为斑状石榴紫苏花岗岩;浅灰色为淡色石榴二长花岗岩

均 53.06, La/Sm 平均 11.38, 轻重稀土分异更加强烈, 具有 Eu 正异常(图 6a), 原始地幔标准化微量元素蜘蛛图解显示了更加强烈的 Nb、Ta 和 Ti 的亏损, 同时强烈富集 K 和 Pb, Rb、Ba 等亲石元素亦相对富集(图 6b).

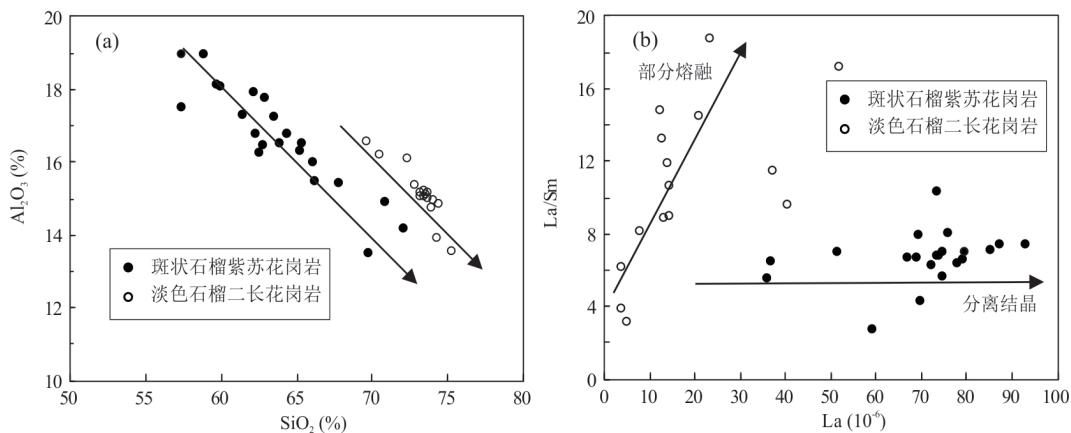
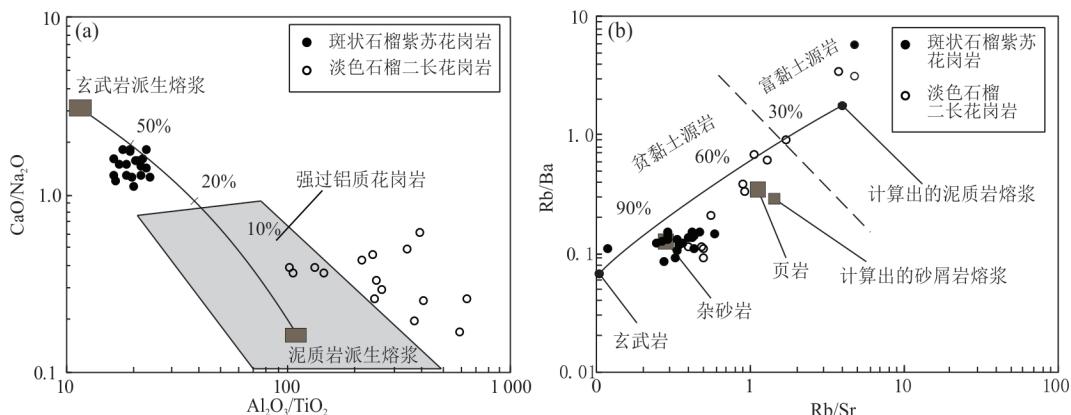
5 讨论

全岩 Zr 饱和温度计算(Miller *et al.*, 2003)显示斑状石榴紫苏花岗岩形成温度为 788~868 °C, 平均 833 °C, 淡色石榴二长花岗岩形成温度为 599~811 °C, 平均 690 °C, 虽然该方法获得的温度为岩浆最低结晶温度, 但仍可判断出前者形成温度整体较后者高。 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 协变图解中(图 7a)二者显示了相对独立的演化趋势, 这暗示二者岩浆源区的组成并不相同, La/Sm-La 图解(图 7b)显示斑状石榴紫苏花岗岩经历了明显的分离结晶过程, 这与其含量较低且平坦的重稀土配分形式, 以及 Eu 和 Sr 的相对亏损相符合, 这些特征指示其经历了石榴子石及长石的分离结晶过程, 而相对低硅、高铁镁、富铝的特征显示其重熔源区除包含富铝沉积岩之外, 还受到基性铁镁质组分的影响, Peng *et al.*(2012b)通过 Nd 同位素及地球化学等研究, 认为斑状石榴紫苏花岗岩的源区包括了地幔物质组分; 而淡色石榴二长花岗岩则显示了明显的部分熔融趋势, 其相对高硅、贫铁镁, 稀土含量相对较低且微量元素富集及亏损程度均更加强烈; Wang *et al.*(2017)通过对凉城淡色石榴花岗岩的研究, 认为其形成压力适中, 温度较低(746~780 °C)且源区为具有较高含水组分的沉积岩。在判别源岩成分的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}\text{-Al}_2\text{O}_3$ /

TiO_2 图解(图 8a)及 $\text{Rb}/\text{Ba}\text{-Rb}/\text{Sr}$ 判别图解(图 8b)中, 斑状石榴紫苏花岗岩均落在靠近玄武质熔浆的区域, 指示其源岩组成除沉积岩之外, 包括较多的幔源物质贡献; 淡色石榴花岗岩在 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 图解中落在靠近强过铝质花岗岩及泥质岩源岩区域附近, 在 $\text{Rb}/\text{Ba}\text{-Rb}/\text{Sr}$ 图解中则分散落入杂砂岩—页岩—泥质岩源岩区域, 显示其源岩主要为沉积岩类。

两类重熔花岗岩具有不同的成因和岩浆演化过程, 结合相近的侵位年龄(1 954 Ma 及 1 956 Ma), 二者可能形成于同一构造背景, 从斑状石榴紫苏花岗岩源岩包含幔源物质贡献这一特征推断, 基性岩浆底侵造成的重熔可以作为二者形成的合理解释。成分及岩性的差异更多地受到源岩组分及熔融过程的控制, 斑状石榴紫苏花岗岩形成温度较高, 源岩混合了一定比例的幔源物质组分, 岩浆形成后经过石榴石及长石的分离结晶; 而淡色石榴二长花岗岩形成温度较低, 源岩包含了更多孔兹岩系沉积岩的组分, 并较少受到幔源组分的影响。

前人在徐武家获得的基性岩墙结晶年龄为 1 931±8 Ma, 在凉城红庙子基性岩墙中获得了 1 954 Ma 的结晶年龄(Peng *et al.*, 2010), 与超高温变质年龄接近(~1.92 Ga; Santosh *et al.*, 2006, 2007); Guo *et al.*(2012)认为该期基性岩浆事件提供了超高温变质需要的额外的热量, 本文两种类型重熔花岗岩岩浆形成略早于~1.92 Ga, 与 1.95~1.93 Ga 的基性岩墙活动近乎同期, 显示其重熔与孔兹岩系的超高温变质可能共同受到同一期基性岩浆底侵事件的影响, 重熔岩浆记录了稍早期岩浆形成及结晶的时代, 而孔兹岩系中记录的超高温峰期变质时代稍

图7 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 协变图解(a)及 La/Sm - La 图解(b)Fig.7 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ diagram (a) and La/Sm - La diagram (b)图8 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 图解(a)及 Rb/Ba - Rb/Sr 判别图解(b)(据 Sylvester, 1998)Fig.8 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ diagram (a) and Rb/Ba - Rb/Sr diagram (b) (after Sylvester, 1998)

晚1.827 Ma变质年龄代表的事件可能对重熔花岗岩的影响较为局限,能够较好解释这一系列证据的构造模式为俯冲板片断离及碰撞后加厚地壳的重熔,两种构造模式均可产生幔源物质底侵,需要进一步研究及更多证据来判断地幔上涌的具体构造模式,但结合基性岩墙、超高温变质作用及重熔花岗岩的大规模出现,至少指示1.95~1.92 Ga华北克拉通已经处于伸展背景。

6 结论

(1) 斑状石榴紫苏花岗岩形成温度较高($>833^\circ\text{C}$),源岩为孔兹岩系沉积岩混合了一定比例的幔源物质组分;淡色石榴二长花岗岩形成温度较低($>690^\circ\text{C}$),源岩主要为孔兹岩系沉积岩,较少受到幔源组分的影响。

(2) 集宁地区斑状石榴紫苏花岗岩侵位时代为1.954 Ma,并具有1.827 Ma的变质事件信息;淡色

石榴二长花岗岩侵位时代为1.956 Ma;两类花岗岩形成于同一时代,可能共同源自1.95~1.93 Ga的基性岩浆底侵造成的重熔。

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)。

References

- Chen, H. D., Wang, Z. L., Lu, N., et al., 2016. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Age and Tectonic Significance of the Garnet Granites from Helin-Liangcheng Zone of Central Inner Mongolia. *Geology in China*, 43(1): 81—90 (in Chinese with English abstract).
- Guo, J. H., Peng, P., Chen, Y., et al., 2012. UHT Sapphirine Granulite Metamorphism at 1.93—1.92 Ga Caused by Gabbronorite Intrusions: Implications for Tectonic Evolution of the Northern Margin of the North China Craton. *Precambrian Research*, 222—223: 124—142. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.07.020>
- Kröner, A., Wilde, S. A., Li, J. H., et al., 2005. Age and Evolution of a Late Archean to Paleoproterozoic Upper

- to Lower Crustal Section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping Terrain of Northern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 577–595. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.01.001>
- Kröner, A., Wilde, S. A., Zhao, G. C., et al., 2006. Zircon Geochronology and Metamorphic Evolution of Mafic Dykes in the Hengshan Complex of Northern China: Evidence for Late Palaeoproterozoic Extension and Subsequent High-Pressure Metamorphism in the North China Craton. *Precambrian Research*, 146(1–2): 45–67. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.01.008>
- Luo, Z. B., Zhang, H. F., Zhang, R. Y., et al., 2012. Forming Temperatures of Paleoproterozoic Metamorphic Peraluminous-Strong Peraluminous Granites in Zhuoziliangcheng, Inner Mongolia: Evidence for Regional High-Ultra High Temperatures Metamorphism. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 32(2): 20–30 (in Chinese with English abstract).
- Miller, C. F., McDowell, S. M., Mapes, R. W., 2003. Hot and Cold Granites? Implications of Zircon Saturation Temperatures and Preservation of Inheritance. *Geology*, 31(6): 529. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)0310529:hacgio>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)0310529:hacgio>2.0.co;2)
- Peng, P., Guo, J. H., Windley, B. F., et al., 2012b. Petrogenesis of Late Paleoproterozoic Liangcheng Charnockites and S-Type Granites in the Central-Northern Margin of the North China Craton: Implications for Ridge Subduction. *Precambrian Research*, 222–223: 107–123. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.06.002>
- Peng, P., Guo, J. H., Zhai, M. G., et al., 2010. Paleoproterozoic Gabbronoritic and Granitic Magmatism in the Northern Margin of the North China Craton: Evidence of Crust-Mantle Interaction. *Precambrian Research*, 183(3): 635–659. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.08.015>
- Peng, P., Guo, J. H., Zhai, M. G., et al., 2012a. Genesis of the Hengling Magmatic Belt in the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic Tectonics. *Lithos*, 148: 27–44. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.05.021>
- Peng, P., Zhai, M. G., Zhang, H. F., et al., 2004. Geochemistry and Geological Significance of the 1.8 Ga Mafic Dyke Swarms in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 439–456 (in Chinese with English abstract).
- Santosh, M., Sajeev, K., Li, J. H., 2006. Extreme Crustal Metamorphism during Columbia Supercontinent Assembly: Evidence from North China Craton. *Gondwana Research*, 10(3–4): 256–266. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.06.005>
- Santosh, M., Wilde, S. A., Li, J. H., 2007. Timing of Paleoproterozoic Ultrahigh-Temperature Metamorphism in the North China Craton: Evidence from SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology. *Precambrian Research*, 159(3–4): 178–196. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.06.006>
- Sylvester, P. J., 1998. Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, 45(1–4): 29–44. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00024-3](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00024-3)
- Wang, L. J., Guo, J. H., Yin, C. Q., et al., 2017. Petrogenesis of Ca. 1.95 Ga Meta-Leucogranites from the Jingling Complex in the Khondalite Belt, North China Craton: Water-Fluxed Melting of Metasedimentary Rocks. *Precambrian Research*, 303: 355–371. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.04.036>
- Wang, Y. J., Peng, T. P., Fan, W. M., et al., 2007. Early Proterozoic Mafic Dikes in the North China Craton and Their Tectonic Implications. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 26(1): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., Zhao, G. C., Cawood, P. A., et al., 2008. Geochemistry of Paleoproterozoic (~1 770 Ma) Mafic Dikes from the Trans-North China Orogen and Tectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(1/2): 61–77. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2007.10.018>
- Wei, C. J., 2018. Paleoproterozoic Metamorphism and Tectonic Evolution in Wutai-Hengshan Region, Trans-North China Orogen. *Earth Science*, 43(1): 24–43 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., 2004. 2.1–1.7 Ga Geological Event Group and Its Geotectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1343–1354 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., 2012. Evolution of the North China Craton and Early Plate Tectonics. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1335–1349 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., Liu, W. J., 2003. Palaeoproterozoic Tectonic History of the North China Craton: A Review. *Precambrian Research*, 122(1–4): 183–199. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00211-5](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00211-5)
- Zhai, M. G., Peng, P., 2007. Paleoproterozoic Events in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2665–2682 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., Santosh, M., 2011. The Early Precambrian Odyssey of the North China Craton: A Synoptic Overview. *Gondwana Research*, 20(1): 6–25. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.02.005>
- Zhang, H. F., Luo, Z. B., Wang, H. Z., 2013. Paleoproterozoic 2.0 Ga Meta-Granite in the Liangcheng Area, Inner Mongolia: Constraint on Regional Ultra-High Temperature Metamorphism. *Acta Petrologica Sinica*, 29

- (7): 2391—2404 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. H., Tian, H., Wang, H. C., et al., 2019. Re-Definition of the Two-Stage Early-Precambrian Meta-Supracrustal Rocks in the Huai'an Complex, North China Craton: Evidences from Petrology and Zircon U-Pb Geochronology. *Earth Science*, 44(1): 1—22 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. H., Wang, H. C., Guo, J. H., et al., 2020. Petrogenesis of the ~2.03 Ga Meta-Garnet Granite in the Huai'an Complex of the North China Craton: Further Evidence on a Paleoproterozoic Rift-Related Tectonic Regime. *Geological Survey and Research*, 43(2): 114—126 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Q., Wang, G. M., Xu, Y. W., et al., 2015. Methods for Choosing Target Points *In-Situ* Zircon U-Pb Dating. *Geological Survey and Research*, 38(3): 233—238 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Q., Zhang, T., Chen, H. D., et al., 2016. LA-MC-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Garnet Monzonitic Granite in the Manhan Mountain of Liangcheng, Inner Mongolia, and Its Petrogenesis. *Geology in China*, 43(3): 768—779 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. C., Cawood, P. A., Li, S. Z., et al., 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key Issues and Discussion. *Precambrian Research*, 222—223: 55—76. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.09.016>
- Zhao, G. C., Cawood, P. A., Lu, L. Z., 1999. Petrology and *P-T* History of the Wutai Amphibolites: Implications for Tectonic Evolution of the Wutai Complex, China. *Precambrian Research*, 93(2—3): 181—199. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(98\)00090-4](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(98)00090-4)
- Zhao, G. C., Cawood, P. A., Wilde, S. A., et al., 2000. Metamorphism of Basement Rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic Tectonic Evolution. *Precambrian Research*, 103(1): 55—88. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(00\)00076-0](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(00)00076-0)
- Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2003. Assembly, Accretion and Breakup of the Paleo-Mesoproterozoic Columbia Supercontinent: Records in the North China Craton. *Gondwana Research*, 6(3): 417—434. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70996-5](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70996-5)
- Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Key Issues Revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177—202. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.10.002>
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 2001. Archean Blocks and Their Boundaries in the North China Craton: Lithological, Geochemical, Structural and *P-T* Path Constraints and Tectonic Evolution. *Precambrian Research*, 107(1—2): 45—73. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(00\)00154-6](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(00)00154-6)
- Zhong, C. T., Deng, J. F., Wan, Y. S., et al., 2007. Magmarecording of Paleoprotozoic Orogeny in Central Segment of Northern Margin of North China Craton: Geochemical Characteristics and Zircon SHRIMP Dating of S-Type Granitoids. *Geochimica*, 36(6): 585—600 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈海东, 王子龙, 鲁宁, 等, 2016. 内蒙古中部和林—凉城一带石榴花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及构造意义. *中国地质*, 43(1): 81—90.
- 罗志波, 张华锋, 张若愚, 等, 2012. 内蒙卓资—凉城地区古元古代变质过铝/强过铝花岗岩的形成温度: 区域高温/超高温变质作用证据. *矿物岩石*, 32(2): 20—30.
- 彭澎, 翟明国, 张华锋, 等, 2004. 华北克拉通 1.8 Ga 镁铁质岩墙群的地球化学特征及其地质意义: 以晋冀蒙交界地区为例. *岩石学报*, 20(3): 439—456.
- 王岳军, 彭头平, 范蔚茗, 等, 2007. 华北陆块早元古代基性岩墙群及其构造意义. *矿物岩石地球化学通报*, 26(1): 1—9.
- 魏春景, 2018. 华北中部造山带五台—恒山地区古元古代变质作用与构造演化. *地球科学*, 43(1): 24—43.
- 翟明国, 2004. 华北克拉通 2.1~1.7 Ga 地质事件群的分解和构造意义探讨. *岩石学报*, 20(6): 1343—1354.
- 翟明国, 2012. 华北克拉通的形成以及早期板块构造. *地质学报*, 86(9): 1335—1349.
- 翟明国, 彭澎, 2007. 华北克拉通古元古代构造事件. *岩石学报*, 23(11): 2665—2682.
- 张华锋, 罗志波, 王浩铮, 2013. 内蒙凉城 2.0 Ga 变质花岗岩对超高温变质作用的制约. *岩石学报*, 29(7): 2391—2404.
- 张家辉, 田辉, 王惠初, 等, 2019. 华北克拉通怀安杂岩中早前寒武纪两期变质表壳岩的重新厘定: 岩石学及锆石 U-Pb 年代学证据. *地球科学*, 44(1): 1—22.
- 张家辉, 王惠初, 郭敬辉, 等, 2020. 华北克拉通怀安杂岩中 ~2.03 Ga 变质石榴花岗岩的成因及其对古元古代裂谷事件的制约. *地质调查与研究*, 43(2): 114—126.
- 张永清, 王国明, 许雅雯, 等, 2015. 锆石微区原位 U-Pb 定年的测定位置选择方法. *地质调查与研究*, 38(3): 233—238.
- 张玉清, 张婷, 陈海东, 等, 2016. 内蒙古凉城蛮汗山石榴石二长花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及成因讨论. *中国地质*, 43(3): 768—779.
- 钟长汀, 邓晋福, 万渝生, 等, 2007. 华北克拉通北缘中段古元古代造山作用的岩浆记录: S型花岗岩地球化学特征及锆石 SHRIMP 年龄. *地球化学*, 36(6): 585—600.