

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.318>



华北古元古代碳酸岩起源深度及现代板块构造启动

许成,匡光喜,曾亮,宋文磊,邓淼,韦春婉

北京大学地球与空间科学学院,造山带与地壳演化教育部重点实验室,北京 100871

摘要:俯冲作用是改变地球内部物质演化的关键因素之一,而现代板块的启动时间一直存在争论。华北克拉通中部造山带内蒙古丰镇古元古代碳酸岩内超硅石榴石包体和榴辉岩捕虏体的发现,为研究岩浆起源深度和板块构造提供了窗口。矿物学和高温高压实验限定超硅石榴石($\text{Si} \sim 3.18 \text{ pfu}$)富集三价铁($\text{Fe}^{3+}/\Sigma \text{Fe} \sim 0.8$),来源于地幔约400 km 的深度表明碳酸岩岩浆起源于地幔过渡带。矿物对温压计和 $P-T$ 视剖面图确定榴辉岩捕虏体变质峰期温压分别为 $\sim 660^\circ\text{C}$ 和 $\sim 2.65 \text{ GPa}$,温压梯度为 $\sim 250^\circ\text{C} \cdot \text{GPa}^{-1}$,与现代板块深俯冲产物相似,说明现代板块构造在古元古代已经启动。统计显示全球古元古代碳酸岩与造山带内高压变质岩石密切共生。全球古元古代的板块俯冲可能与哥伦比亚超大陆的拼合有关。大规模板片俯冲携带地壳沉积物质进入深部地幔,形成碳酸岩岩浆及氧化的富 Fe^{3+} 超硅石榴石。地壳物质在地幔源区循环约20亿年,导致了地幔源区的不均一性以及长时间的碳循环。

关键词:碳酸岩;板块构造;岩浆起源;华北克拉通;丰镇;俯冲作用;岩石学。

中图分类号: P56

文章编号: 1000-2383(2019)04-1083-13

收稿日期: 2018-06-28

Original Depth of Paleoproterozoic Carbonatites in North China Craton and Onset of Modern-Style Plate Tectonics

Xu Cheng, Kuang Guangxi, Zeng Liang, Song Wenlei, Deng Miao, Wei Chunwan

Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: Subduction is one of the key factors that change the evolution of the interior of the Earth, and there have been controversies over the starting time of modern-style plate tectonics. The discovery of majorite garnet inclusions and eclogite xenoliths hosted by the Paleoproterozoic carbonatites in the Fengzhen area, Inner Mongolia, provides a rare window into the origin depth of magma and plate tectonics. Mineralogy and high temperature and pressure experiments constrain the ferric iron-rich ($\text{Fe}^{3+}/\Sigma \text{Fe} \sim 0.8$) majoritic garnets ($\text{Si} \sim 3.18 \text{ pfu}$) originated from about $\sim 400 \text{ km}$ in depth, indicating that the carbonatitic magma originated from the mantle transition zone. The mineral-pair thermobarometer and $P-T$ phase diagram determine the peak metamorphic pressure and temperature at $\sim 660^\circ\text{C}$ and $\sim 2.65 \text{ GPa}$, which gives a peak thermal gradient of $\sim 250^\circ\text{C} \cdot \text{GPa}^{-1}$, similar to the product of modern plate deep subduction, indicating that the modern plate tectonics has started since the Paleoproterozoic. Statistics show that the global Paleoproterozoic carbonatites are closely associated with high-pressure metamorphic rocks in Paleoproterozoic orogens. Global Paleoproterozoic slab subduction might be linked to the Columbia supercontinent amalgamation. Large-scale slab subduction inputted crustal sediments into the deep mantle, forming carbonatitic magmas and oxidized ferric iron-rich majoritic garnets. Crustal materials recycled for about 2 billion years in the mantle source region, leading to the compositional heterogeneities and carbon cycle in the deep mantle.

Key word: carbonatite; plate tectonics; magma origin; North China craton; Fengzhen; subduction; petrology.

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos.41773022,41825008,41573033)。

作者简介:许成(1976—),男,教授,主要从事碳酸岩及其共生矿床研究.E-mail:xucheng1999@pku.edu.cn

引用格式:许成,匡光喜,曾亮,等,2019.华北古元古代碳酸岩起源深度及现代板块构造启动.地球科学,44(4):1083-1095.

板块构造理论自 20 世纪 60 年代提出,至今已经取得重大成功。板块构造是地球区别于其他太阳系类地行星的主要特征,但大量研究发现板块构造理论难以完全解释早前寒武纪的构造过程,其技术瓶颈和理论障碍问题使得相关研究在 20 世纪 90 年代一度停滞。在 21 世纪以后,随着 21~18 亿年拼合的哥伦比亚超大陆的提出,以及计算机模拟技术的发展,使得突破板块构造理论桎梏、开启新的前寒武纪地球动力学研究成为可能,前寒武纪研究再度走向地学前沿(李三忠等,2015)。然而,对板块构造启动时间和机制的认识迄今仍然分歧较大(van Hunen and Moyen, 2012),主要启动时间包括 4.3 Ga、3 Ga、2.7 Ga、1.8~2.7 Ga、1 Ga 和 0.8~0.6 Ga,现代板块构造启动机制包括地幔对流、俯冲作用和刚性块体,对上述 3 种动力机制起源也同样存在争论。地幔对流起源于地幔是双层(上、下地幔)还是单一地幔层(核幔边界),即 MOMO(Stein and Hofmann, 1994) 和 Wilson 循环(Wilson, 1966),这也引起了 Wilson 循环是否仅源于显生宙的争论(Shirey and Richardson, 2011)。大量模拟实验显示(Labrosse and Jaupart, 2007),早期地球温度较高,其上地幔温度比现今高约 300 °C,高温地幔将产生厚的、低密度的板块,因此很难进行深俯冲(van Thienen et al., 2004)。目前也没有报道典型的太古宙蛇绿岩和相关岩石地层组合、稳定台地的沉积建

造、典型岛弧火山岩、活动大陆边缘的钙碱性火山—侵入岩套,因此部分学者提出太古代加厚的板块主要以熔融或拆沉(Foley et al., 2003)或者浅俯冲作用(van Hunen and Moyen, 2012)为主。更为重要的是,由于缺少直接的岩石学证据,因此不能很好地解决现代板块构造何时启动的争论。现代板块构造启动的 3 个岩石学标志是蛇绿岩、蓝片岩和超高压榴辉岩,但目前已知的最老的蓝片岩和柯石英榴辉岩的变质年龄主要为 700~850 Ma 和 620 Ma(Maruyama et al., 1996; Jahn et al., 2001),因此制约了大家对板块构造启动机制和过程的认识。

现代板块俯冲过程中,俯冲板块遭受高压/超高压变质作用,通常相变为蓝片岩或榴辉岩等高压/超高压变质岩石。少量板块上部的沉积物也将随之俯冲至地幔深部(Litasov and Ohtani, 2010)。这说明地表的沉积物可以俯冲至下地幔顶部,它们对地幔源区的氧化—还原环境、物质组成以及岩浆形成起着重要作用。大量实验也证实,碳酸盐质榴辉岩在大于 2.5 GPa 下可以熔融形成碳酸岩岩浆(Sweeney, 1994; Dasgupta and Hirschmann, 2006)。最新的实验也显示,俯冲板块熔融形成碳酸岩岩浆的下限是 660 km。碳酸岩是地表出露较少的幔源岩石之一,多呈小的岩脉、岩株、岩墙和岩锥等产出,与辉石岩、金伯利岩、霓霞岩、霞石岩、煌斑岩、辉长岩、响岩、粗面岩和正长岩等硅酸岩构成环状杂岩体,碳酸岩通常

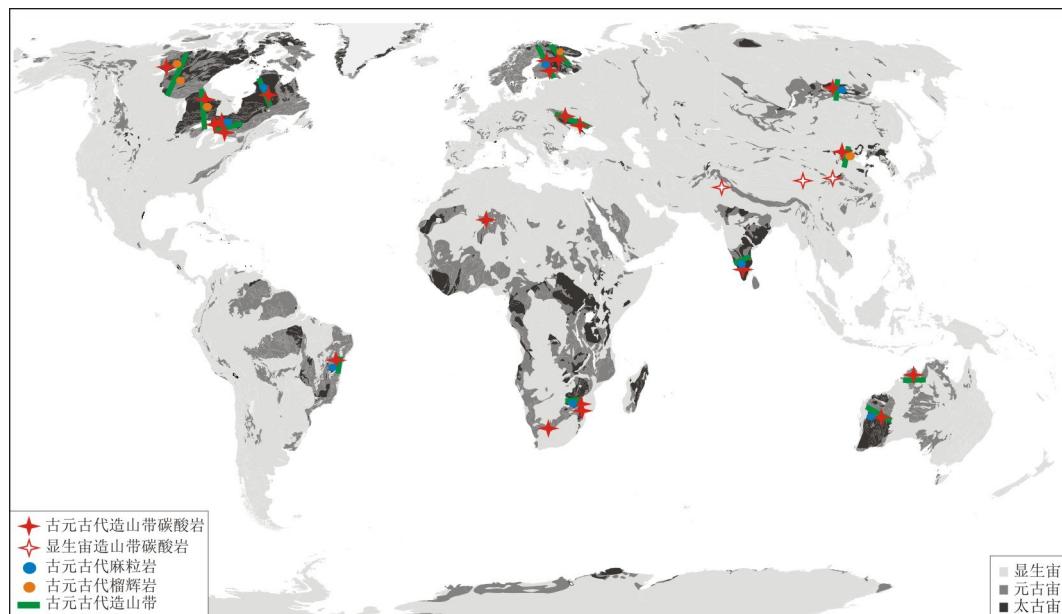


图 1 全球古元古代碳酸岩、麻粒岩、榴辉岩及显生宙造山带碳酸岩分布示意图

Fig.1 Distribution of Paleoproterozoic carbonatites, granulites, eclogites and Phanerozoic orogenic carbonatites worldwide
底图据 Woolley and Kjarsgaard (2008); Xu et al.(2018)

产于大陆裂谷区域,如东非大裂谷、德干高原、加拿大地盾和西伯利亚地盾等地区。在造山带也有报道(许成等,2017),如位于波罗的海克拉通古元古代造山带的芬兰楠塔利碳酸岩、北美克拉通古元古代哈德森中央造山带的加拿大马尼托巴碳酸岩、我国华北克拉通古元古代中部造山带的丰镇—怀安碳酸岩、与喜山运动相关的巴基斯坦西北部和四川攀西碳酸岩,以及秦岭造山带碳酸岩(图1)。与硅酸盐熔体相比,碳酸岩熔体相对富含挥发分,其固结温度、粘度($1.5 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-3}$ Pa · s, Dobson *et al.*, 1996)和密度(2.2 g/cm³, Treiman and Schedl, 1983)均较低,极易流动,其扩散速率很大,且富含不相容元素,在其上升穿越相对较“冷”的岩石圈地幔时,可以与地幔二辉橄榄岩等进行反应,促使地幔发生交代作用,在改变地幔矿物学特征和化学成分的同时,释放富含 CO₂ 的流体(Dasgupta *et al.*, 2013)。碳酸岩从太古宙(格陵兰西部 Tupertalik 碳酸岩的年龄约为 3 Ga, 是目前最古老的碳酸岩)到现今(坦桑尼亚 Oldoinyo Lengai 碳酸岩火山最近一次喷发是 1993 年 6 月)均有产出(Bell and Keller, 1995), 可以用来研究地幔源区的长期演化。因此,碳酸岩被视为研究大陆地幔地球化学动力学的“探针岩石”。

华北克拉通中部造山带丰镇—怀安一带的碳酸岩是我国目前发现的最老的碳酸岩, 岩体内超硅石榴石包体和榴辉岩捕虏体的发现, 对于揭示碳酸岩岩浆起源及其与俯冲板块的成因联系和现代板块构造启动机制具有重要意义。古元古代是地质历史中动力学与热力学格局转变的重要时期, 继承了太古宙已出现的增生造山带及岛弧作用; 构造过程既继承了太古宙, 又具有某些显生宙构造特征, 水平与垂向构造并重, 并相继发生了一系列各具特色的重大地质事件(Condie, 2011)。本文将重点介绍近年来华北中部造山带内古元古代碳酸岩的研究成果, 进而探讨岩浆起源深度及其与现代板块构造启动的成因联系。

1 华北古元古代碳酸岩

华北克拉通是我国三大克拉通之一, 约历了约 38 亿年的漫长演化历史, 东抵苏鲁超高压变质带, 南邻秦岭—大别山超高压变质带, 西至昆仑—祁连山造山带, 北靠中亚造山带。与世界上其他典型的克拉通相比, 尽管华北克拉通出露面积不大, 但经历了多阶段复杂的构造演化, 记录了地球早期几乎所有

的重大地质事件。Zhao *et al.* (2001) 根据基底岩石的岩石学、地球化学、构造地质等特征把华北克拉通划分为东部陆块、中部造山带和西部陆块(图 2a)。东部陆块的基底岩石主要分布于密云、鞍山、鲁西、胶东、冀东、本溪、辽北和吉南等地区, 以高级变质地体和中—低级花岗—绿岩地体产出, 主要形成于新太古代, 局部可见少量太古代早期和古元古代的岩石。从岩石类型上来看, 主要是 2.5~2.8 Ga 的 TTG 片麻岩, 约占整个基底出露面积的 70% 以上。另外还有一些基性—超基性的层状侵入岩和少量表壳岩, 前者主要为科马提质岩石组分, 后者主要包括不同程度变质的双峰式火山岩和沉积岩。这些岩石在 ~2.5 Ga 整体经历了绿片岩相—麻粒岩相的变质作用和透人性变形作用, 同时伴有大量同构造紫苏花岗岩产出。西部陆块主要由孔兹岩带、鄂尔多斯陆块和阴山陆块组成。孔兹岩带是一条近东西向展布、长约 1 000 km 的古元古代碰撞型造山带, 主要由孔兹岩系组成。孔兹岩的原岩主要为变泥砂质岩石, 且成熟度高, 其岩石组合为石墨—含矽线石—石榴子石片麻岩、石榴子石石英岩、长英质副片麻岩、钙质硅酸岩和大理岩(Zhao *et al.*, 2002)。西部陆块基底岩石主要分布于阴山地块和孔兹岩带, 包括大青山—乌拉山、固阳—武川、贺兰山、千里山、色尔腾山以及阿拉善等地区, 由新太古代—古元古代表壳岩、TTG 质岩石、花岗岩以及变质基性岩脉组成。鄂尔多斯地块几乎完全被中生代—新生代沉积盖层覆盖。西部陆块新太古代岩石组合与东部陆块的相似, 变质作用也都表现为等压冷却型逆时针 P-T 演化特征(Zhao *et al.*, 2005)。中部造山带长约 1 500 km, 近南北向展布, 大致与南北重力梯度带重合, 位于东、西陆块之间, 分别以信阳—开封—建平等石家庄断裂带和华山—大同—离石—多伦断裂带为界。其基底岩石主要出露于太华、登封、阜平、中条、赞皇、吕梁、宣化、恒山、五台、怀安等地区, 主要由新太古代—古元古代晚期的表壳岩、TTG 片麻岩、铁镁质岩墙和花岗岩组成。中部造山带为典型的陆—陆碰撞带, 带内构造岩大多表现有多期强烈变形、紧闭同斜褶皱、鞘褶皱、矿物拉伸线理、大规模韧性剪切带, 且推覆体发育。恒山—宣化—怀安—承德一线出露有大量的退变榴辉岩和高压麻粒岩(Zeng *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2017)。带内所有变质岩的 P-T 轨迹均具有近等温降压型的顺时针演化特征(Zhao *et al.*, 2001), 并有以吕梁群、野鸡山群、嵩山群和滤论群为代表的前陆盆地的存在(Trap *et al.*, 2009)。

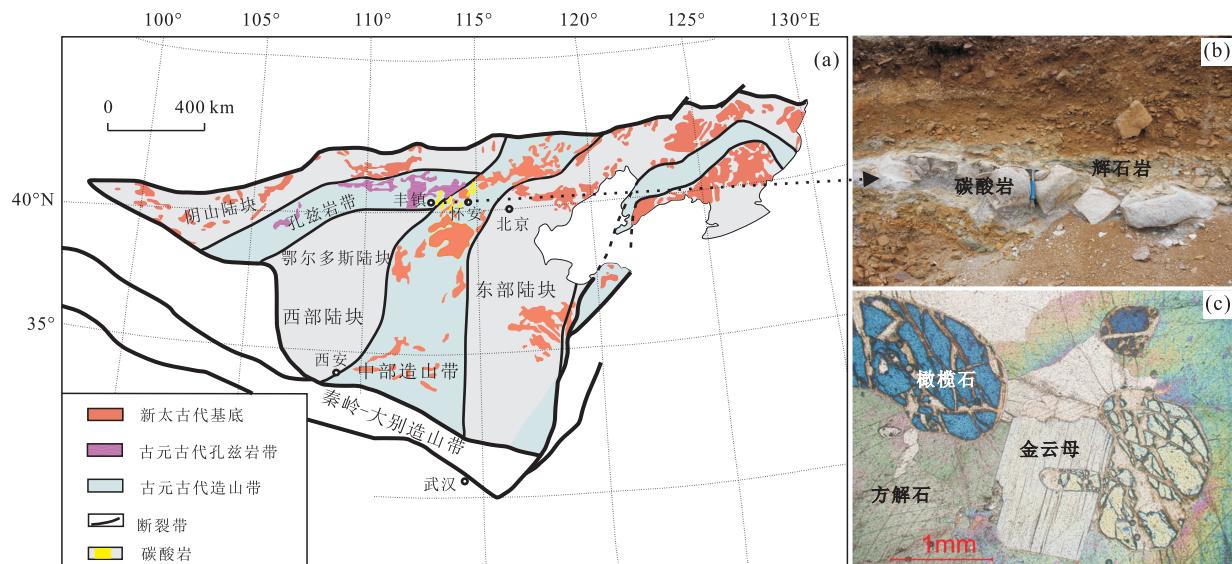


图 2 华北克拉通丰镇—怀安碳酸岩地质特征

Fig.2 Geological characteristics of carbonatites from Fengzhen and Huai'an areas in the North China craton

a.华北克拉通地质简图;b.碳酸岩野外照片;c.碳酸岩显微照片(正交偏光)

中部造山带的内蒙古丰镇—河北怀安一带出露了大量的碳酸岩(图 2b),呈脉状侵入古元古代淡色花岗岩内。该花岗岩主要由长石和石英组成,缺少暗色矿物,其岩浆锆石 U-Pb 年龄为 $2\,199 \pm 3$ Ma,具有高 SiO_2 含量(74.8%~83.4%),属于中钾钙碱性过铝质 I 型花岗岩。它们稀土含量偏低,具有明显 Eu 正异常,表明其未经历强烈的长石分离结晶作用。淡色花岗岩的微量元素组成具有岛弧和同碰撞花岗岩的特征。全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和锆石 ϵ_{Hf} 同位素参数也显示正值。Zeng *et al.*(2017)提出丰镇淡色花岗岩是太古宙长英质 TTG 岩石部分熔融的产物,它们形成于弧—陆碰撞环境。此外,他们也报道了丰镇石榴石花岗岩和高压麻粒岩的成岩和变质年龄分别为 $2\,002 \pm 3$ Ma 和 $1\,967 \pm 10$ Ma。高压基性麻粒岩主要由斜长石、透辉石、紫苏辉石、角闪石、石榴石和石英等矿物组成,具有近等温快速降压的“白眼圈”结构,通过矿物对温压计计算,推算其峰期温、压条件分别为 ~ 840 °C、 $\sim 12 \times 10^2$ MPa(Zeng *et al.*, 2017)。碳酸岩岩脉以北北东走向为主,脉体最长可达 900 m,脉厚可达 20 m。碳酸岩与辉石岩及辉石正长岩密切共生。丰镇碳酸岩主要由粗粒方解石组成,次要矿物和副矿物主要包括氟磷灰石、辉石、橄榄石、金云母、尖晶石、钙钛矿、钛铁矿和稀土矿物(图 2c)。碳酸岩中方解石含量通常 $> 90\%$,颗粒大小在 1~2 cm 范围内。氟磷灰石是碳酸岩中常见的副矿物,含量最多达 5%,呈椭圆状产出。在背散射图像上,可观察到两

种交代成因的稀土矿物(Feng *et al.*, 2016):(1)独居石、磷灰石、Ca-REE—碳酸盐矿物、少量石英和重晶石呈自形或他形的包体分布于氟磷灰石内,多数包体大小为 1~2 μm (最大可达 5 μm);(2)独居石、褐帘石、石英和重晶石呈环带沿氟磷灰石边缘生长,部分稀土矿物完全交代氟磷灰石,呈假晶形态出现。对丰镇和怀安碳酸岩内磷灰石进行原位 LA-ICPMS 测年,得到其 U-Pb 加权平均年龄分别为 $1\,681 \pm 61$ Ma 和 $1\,765 \pm 35$ Ma(Xu *et al.*, 2018)。

2 碳酸岩岩浆起源深度

地幔岩浆的起源深度关系到固态地幔的温度、组成和氧化还原等因素的变化,是研究地幔对流增生、地壳物质(特别是沉积物)俯冲与地幔相互作用等地幔动力学的关键因素之一。目前研究者认识地幔深部的物质组成主要来源于地球物理数据、高温高压实验和金刚石内的子矿物包体。有关岩浆起源的深度也主要来源于实验工作,很难从岩石学,特别是从地幔捕虏体中获得直接的证据,大多数地幔捕虏体的起源深度通常小于 250 km(Jacob, 2004; Agard *et al.*, 2009)。因此,碳酸岩岩浆的起源深度存在很大争论,近年来《Nature》和《Science》的相关文章从地球物理和地球化学研究给出了不同的证据,这直接关系到碳从地球深部返回到地表的途径和过程。Gaillard *et al.*(2008)通过实验证明熔融碳

酸盐是上地幔最导电的物相,全球软流圈的高导电性指示地幔橄榄岩中存在少量碳酸岩;Walter *et al.* (2008)根据巴西 Juina 金刚石内超硅石榴石和钙钛矿包体的化学组成和模拟实验限定这些包体矿物,是从深俯冲洋壳低度熔融形成的初始碳酸岩岩浆中结晶的,从而提出碳酸岩岩浆起源于过渡带或上地幔底部;高温高压实验证实含水地幔橄榄岩或俯冲板块在地球 200~250 km 或最深可达 700 km 的深度熔融形成碳酸岩岩浆(Dasgupta *et al.*, 2013; Thomson *et al.*, 2016).然而,Fischer *et al.*(2009)提出全球上地幔的碳库是均匀的,并无碳酸岩岩浆的异常点存在,碳酸岩是富 CO₂ 硅酸岩岩浆在地壳液态不混溶的产物.由于目前研究者获得深源捕虏体的资料有限,深部地幔的信息主要来自高温高压实验模拟和金刚石内的超高压矿物,软流圈以下的地幔捕虏体相当罕见,这强烈制约了大家对岩浆起源、深部碳循环以及地幔氧逸度的认识.

Xu *et al.*(2017, 2018)在华北中部造山带的丰镇碳酸岩内发现了榴辉岩和石榴辉石岩两类捕虏体,并在石榴石晶体内发现了超硅石榴石包体,为碳酸岩岩浆的起源提供了直接的岩石学证据.超硅石榴石[(Ca, Mg, Fe²⁺)₃(Fe³⁺, Al, Si)₂(SiO₄)₃]是上地幔橄榄岩和超深俯冲板片的一种重要组成成分,主要分布于地幔 200 km 以下(Wood *et al.*, 2013).由于其硅具有六次配位结构,区别于一般石榴石,并且六配位硅的含量越高,其形成的压力越大.实验显示(Irifune *et al.*, 1986; Nakatsuka *et al.*, 1999),随着压力增加,与石榴石共生的辉石分解,辉石中的 Si 进入石榴石中,占据六配位结构.因此超硅石榴石分子式中的 Si 分子数大于普通石榴石(Si=3 pfu),并且压力越大,超硅的分子量越大.根据(Na)^[1+]+(Ti+Si)^[4+]=(M)^[2+]+(Al+Cr)^[3+],其中 M²⁺代表 Fe²⁺、Mg²⁺、Ca²⁺,Collerson *et al.*(2010)总结的超硅石榴石形成压力与化学分子组成之间的关系为:P(GPa)=5.78+(18.23×X^{cat}Mj),其中,X^{cat}Mj=(X^{cat}Mj₍₁₎+X^{cat}Mj₍₂₎)/2,X^{cat}Mj₍₁₎=[^{IV, VI}(Si+Ti)-3+^{VIII}Na],X^{cat}Mj₍₂₎=[1-0.5×^{VI}(Al+Cr)]+^{VIII}(Na×1.25).

丰镇碳酸岩内两类捕虏体中的石榴石颗粒可依据其化学组成的不同划分为 Grt-I 和 Grt-II 型.Grt-I 石榴石都包裹绿辉石、蓝晶石、石英、磷灰石、金红石等矿物,具有高 CaO、低 Cr₂O₃ 的特征,显然是榴辉岩相的来源.Grt-II 石榴石显示高 CaO、Cr₂O₃ 含量,其化学组成与辉石质岩石的石榴石相

似,Grt-II 含有少量的超硅石榴石组分(Si=3.014±36 pfu).在 Grt-II 中发现了超硅石榴石包体(图 3a, 3b),粒状的超硅石榴石包体具有清晰的颗粒边界,直径 100~300 μm,没有包裹硅酸盐矿物.超硅石榴石包体显示异常富 SiO₂ (44.20%±38%, Si=3.15~3.22 pfu)、亏损 Al₂O₃ (7.09%±41%) 的特征,并且相对寄主石榴石(Grt-II)具有较高的 MgO 含量(~27.16%)、较低的 CaO 含量(~1.35%).通过电价平衡计算得到超硅石榴石的 Fe³⁺/ΣFe=0.87±0.05.超硅石榴石具有低 CaO 含量(1.35%±32%)和高 Cr₂O₃ 含量(1.10%±44%)的特征,与 Grt-I 和 Grt-II 不同,超硅石榴石的源岩为橄榄质岩石(Kiseeva *et al.*, 2013, 2016).为了更充分地证明超硅石榴石包体的超硅性质,除了矿物化学分析,Xu *et al.*(2017)还进行了单晶 X 射线衍射、拉曼光谱和穆斯堡尔谱的测试分析.单晶 X 射线衍射参数显示其为等轴晶系,晶胞参数 a=11.567 5(±2) Å, V=1 547.83(±9) Å³,与石榴石族矿物相似.拉曼光谱分析显示多处特征性的尖峰,包括 675 cm⁻¹、689 cm⁻¹、1 069 cm⁻¹ 和 1 089 cm⁻¹,都很好地指示了硅的六配位结构(Hofmeister *et al.*, 2004),与普通石榴石完全不同.穆斯堡尔谱分析也显示超硅石榴石具有异常高的 Fe³⁺ (Fe³⁺/ΣFe=0.81±0.01).随着压力增加,超硅石榴石会发生歧化反应导致三价铁增加.实验显示在 14 GPa 超硅石榴石的 Fe³⁺/ΣFe 小于 0.4(Rohrbach *et al.*, 2007),明显低于丰镇样品.

根据上述 Collerson *et al.*(2010)的压力公式,获得 Grt-II 石榴石的形成压力为 6.4 GPa (~200 km);将超硅石榴石的全铁考虑成 Fe²⁺的情况下,获得超硅石榴石的形成压力为 10~14 GPa.但这种压力计算中忽视了 Fe³⁺,给压力标定带来了很大的不确定性.为了进一步限定富三价铁超硅石榴石的形成压力,Xu *et al.*(2017)在 6.5~15 GPa 压力条件下合成了与丰镇超硅石榴石化学组成相似的矿物,其 Fe³⁺/ΣFe 约为 0.55.考虑了 Fe³⁺、Cr³⁺ 和 Al³⁺ 在超硅石榴石中的替换关系,实验结果呈很好的线性关系,即 P(GPa)=5.61(±0.40)+37.98(±2.29)×X^{cat}Mj,从而获得丰镇超硅石榴石的形成压力为 12.9±1.1 GPa (~380 km),并且这只是一个压力下限,因为天然的超硅石榴石包体比实验合成的超硅石榴石具有更高的 Fe³⁺/ΣFe 比值 (~0.8),而压力与 Fe³⁺/ΣFe 比值呈正相关关系.大量来自地幔金刚石和撞击陨石的超硅石榴石显示富 Fe³⁺

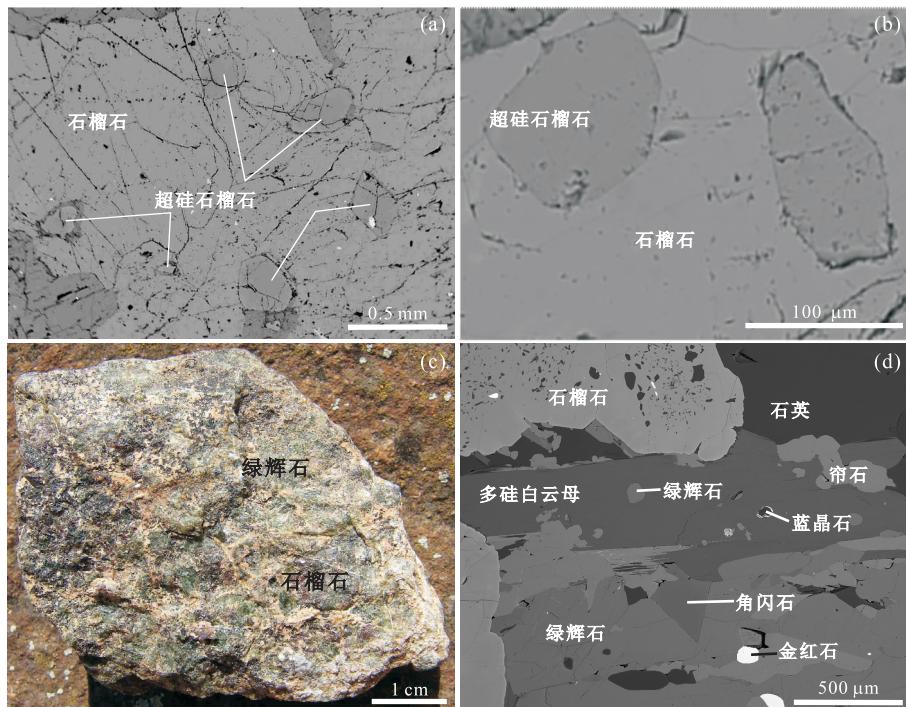


图 3 超硅石榴石及榴辉岩捕虏体照片

Fig.3 Photographs of the majoritic garnets and the eclogite xenolith

a,b.超硅石榴石及其寄主石榴石背散射图像;c.榴辉岩捕虏体手标本;d.榴辉岩捕虏体背散射图像.底图据 Xu et al.(2017,2018)

的特征($\text{Fe}^{3+}/\sum \text{Fe}$ 高达 0.94,Tao et al.,2018).为了进一步限定三价铁对超硅石榴石压力计算的影响,Tao et al.(2018)从 6.5~15 GPa 和 1 000~1 600 °C 合成了一系列含 Fe^{3+} 的超硅石榴石.实验合成的超硅石榴石的 $\text{Fe}^{3+}/\sum \text{Fe}$ 含量通过电子探针分析的 Flank 方法检测(Höfer et al.,1994),得到 $\text{Fe}^{3+}/\sum \text{Fe}$ 的比值为 0.13~0.68、Si 含量(pfu)为 3.03 (6.5 GPa)~3.25 (15 GPa).他们获得了新的压力计: $P(\text{GPa})=5.80+(18.21+34.32\times\text{Fe}^{3+}/\sum \text{Fe})\times X^{\text{cat}}\text{Mj}$.根据新的压力公式确定丰镇超硅石榴石的形成压力为 12.9~15.8 GPa(图 4),表明这些超硅石榴石来自于地幔过渡带.

但是,来自地幔过渡带的超硅石榴石是如何被浅部(~ 200 km)的石榴石所捕获的呢?超硅石榴石和寄主石榴石之间的成分差异与结构关系显然不支持它们具有成因联系.因此,超硅石榴石可能是被搬运到浅部地幔的,而后被辉石质石榴石所捕获、包裹.该模型需要一种特殊的动力学过程,即在含碳酸盐的熔体中搬运和被高温地幔上涌,迅速将超硅石榴石从 ~ 400 km 搬运到 ~ 200 km 深度,且不分解超硅石榴石.碳酸岩岩浆富含挥发分,在地幔温压条件下的粘度($1.5\times 10^{-2}\sim 5\times 10^{-3}$ Pa·s)远低于硅酸盐熔体(Dobson et al.,1996),是目前地球上已知

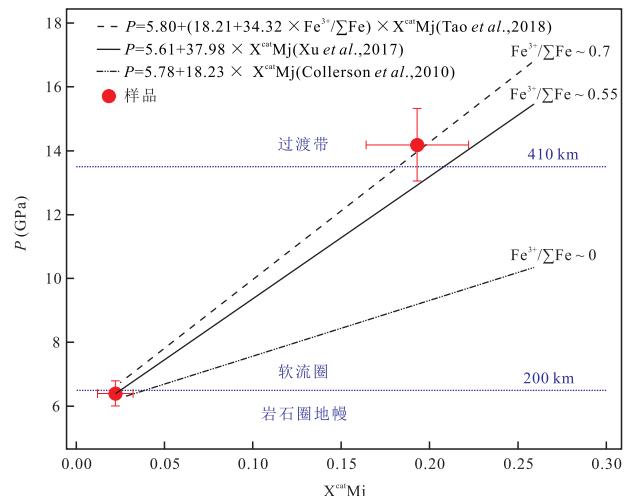


图 4 超硅石榴石形成压力估计

Fig.4 Estimated pressures for the formation of the majoritic garnets

的粘度最小的岩浆.碳酸岩岩浆还具有较低的密度(2.2 g/cm³,Treiman and Schedl,1983)和固化温度(Wyllie,1989),表明它们可以在地幔内快速迁移,并能捕获超硅石榴石.碳酸岩岩浆的氧化还原反应也能为超硅石榴石的高 $\text{Fe}^{3+}/\sum \text{Fe}$ 含量给出合理的解释.

超硅石榴石被低粘度的、迅速上升的碳酸岩岩浆快速搬运是可能的(Genge et al.,1995),含碳酸

盐的洋壳能在大约 300~700 km 的深度发生熔融,因为在这个深度范围内,熔融曲线有一个急剧下降的趋势,金刚石中的矿物包裹体也曾被推测与起源于地幔过渡带的碳酸岩岩浆有关(Walter *et al.*, 2008)。超硅石榴石的高 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值能够通过碳酸盐发生还原反应并使还原地幔中的铁组分氧化而产生(McCammon, 2005)。残余的碳酸岩岩浆能够促进地幔矿物的快速上升。对于第 2 种机制,在古元古代之前地幔上涌将超硅石榴石带到浅部,就像挪威西部超深地幔岩石多个世代的形成一样(Scambelluri *et al.*, 2008)。这种机制暗示上地幔下部以及过渡带可能存在富集 Fe^{3+} 的高度氧化环境,这与大量高温高压实验结果矛盾(Frost and McCammon, 2008),同时高温地幔上涌导致的减压熔融过程很难将超硅石榴石保存下来,它们将分解成普通石榴石和单斜辉石。因此,超硅石榴石必须迅速上升到一个相对冷的环境,才能保存其结构和成分。寄主石榴石与超硅石榴石包体记录了两个截然不同的地幔深度,这对古超大陆拼合与裂解过程中的地幔演化及其对流有着重要的指示意义。富 Fe^{3+} 超硅石榴石为研究地幔的化学和动力学过程提供了难得的机会,这也指示碳酸岩岩浆可以形成于地幔过渡带;古元古代可能存在地壳物质深俯冲过程,为超硅石榴石的氧化和保存提供了物质和相对冷的折返空间。

3 现代板块构造争论

近年来,《Science》和《Nature》期刊均关注太古宙存在板块构造的研究成果。Shirey and Richardson (2011)对多处太古宙克拉通金伯利岩中金刚石的包裹体进行了定年和同位素研究,包括硅酸盐矿物 Sm-Nd 同位素和硫化物 Re-Os 同位素的模式年龄。他们发现,来源于橄榄质源区和榴辉质源区的金刚石均出现亏损的 Nd 同位素组成,但前者的年龄从 35 亿年至今均有分布,而榴辉质源区的金刚石主要集中在 30~10 亿年,并且 Os 同位素值较高。他们提出,金刚石中的榴辉质成分是地壳物质俯冲的产物,30 亿年榴辉岩型金刚石的出现可作为板块构造启动时间的下限。但是,地幔榴辉岩的成因还存在很多争论。许多学者对金伯利岩内的榴辉岩进行了研究,提出了深部幔源熔体高压堆晶和地壳俯冲物质两种不同的成因观点。因此,还需要进一步仔细鉴别榴辉岩型金刚石的成因,才能更好地约束板块构造的启动时间。大陆地壳的生长也被视为研究地球早期板

块构造的突破口。学者们对全球大量碎屑锆石进行了 U-Pb 年龄和 Hf 同位素分析,提出了不同的地壳增长模式(Hawkesworth and Kemp, 2006; Belousova *et al.*, 2010)。然而锆石可能来源于新生或再造地壳物质,单一的锆石 Hf 二阶段模式年龄很难表征地壳生长量的变化。Dhuime and Storey (2012)结合锆石氧同位素数据,提出再造型锆石通常具有低温或者高温蚀变的氧同位素特征,它们的 U-Pb 年龄明显小于 Hf 模式年龄。在此基础上,Dhuime and Storey (2012)发现在地球 30 亿年左右,再造地壳的比例急剧升高,从之前的不到 20%,猛增到大于 75%,而大陆地壳生长速率急剧降低。这一突变显示在 30 亿年后大陆地壳的破坏速率急剧增加。通常认为大陆地壳破坏的主要机制为下地壳拆沉和上地壳隆升剥蚀,而这两种机制通常都涉及到汇聚型板块边缘,即和板块构造相联系。因此,他们提出在 30 亿年地球板块构造已快速启动。大陆上地壳的地球化学组成变化也被用于揭示板块构造的启动机制。Tang *et al.* (2016)通过对早太古代至今的碎屑沉积物的地球化学组成进行数据分析,发现早太古代至今的大陆上地壳组成存在明显的变化。 MgO 的组成是鉴别碎屑沉积岩镁铁质程度的重要指标,但是镁在地球表层风化过程中表现为高度的活动性,因此不能直接用碎屑沉积岩的 MgO 来反映当时上地壳真实的镁铁质程度。他们搜集了全球不同时代弱蚀变火成岩的主量元素和微量元素组成,发现 $\text{Ni}/\text{Co}, \text{Cr}/\text{Zn}$ 比值和 MgO 含量呈现非常好的相关性。由于 Ni 对于 Co 和 Cr 对于 Zn 均表现出较低的不相容性,而且这 4 个元素均在表生环境保持稳定,因此可以借用 Ni/Co 和 Cr/Zn 来限定上地壳的 MgO 组成。通过统计全球碎屑沉积岩的 Cr/Zn 和 Ni/Co 比值,从而建立起大陆上地壳 MgO 随时间的变化趋势。他们发现,全球上地壳的总体化学组成在 26~32 亿年时由镁铁质急剧转变为长英质,长英质 TTG 岩石在上地壳的体积比例也从早太古代的 10%~40% 猛增至晚太古代的 80% 以上,并认为这一转变的主要因素源于板块构造的启动。因此,Tang *et al.* (2016)提出地球在 30 亿年以前就开始了板块构造。由于火成岩的 $\delta^{49}\text{Ti}$ ($^{49}\text{Ti}/^{47}\text{Ti}$) 值与 SiO_2 含量相关,因此通过页岩的 $\delta^{49}\text{Ti}$ 值就能估计出其源岩的 SiO_2 含量,从而对高于海平面遭受风化作用的陆壳的镁铁质和长英质岩石比例提供限制。Greber *et al.* (2017)通过测量页岩的 $\delta^{49}\text{Ti}$ 值发现,自 3.5 Ga 以来,陆壳的成分一直主要是长英质

(富硅),所有时代页岩的平均 $\delta^{49}\text{Ti}$ 值几乎是一致的,35 亿年之前陆壳主要是长英质的,这种现象只能通过早期板块构造启动来解释,因此,他们认为由洋壳俯冲导致的板块构造作用在 3.5 Ga 就已经启动,甚至可能更早。

现代板块构造是一个长时间的深俯冲过程,板块随着俯冲深度增加,发生从榴辉岩向超硅石榴岩转变的强烈变质作用,其密度发生变化并大于上覆地幔,当俯冲至下地幔顶部约 660 km 左右,其密度小于下地幔,发生停滞(van der Hilst *et al.*, 1991),因此板块深俯冲时间最长可达 100 Ma (van Thienen *et al.*, 2004). 大量模拟实验显示(Labrosse and Jaupart, 2007),早期地球温度较高,其上地幔温度比现今高约 300 °C,太古宙洋壳相对现代洋壳可能也要更厚,目前也没有报道典型的太古宙蛇绿岩和相关岩石地层组合、稳定台地的沉积建造、典型岛弧火山岩和活动大陆边缘的钙碱性火山—侵入岩套。在 27~38 亿年之间,有大量科马提岩在地球表面出露(Herzberg *et al.*, 2007),而科马提岩富含镁,其形成温度为 1 600~1 800 °C,这表明地幔明显处于一种高温状态(图 5a). 地球早期大量的变质作用均显示高温特征,明显不同于显生宙以来的低温俯冲过程($<375\text{ °C} \cdot \text{GPa}^{-1}$, 图 5b). 因此,部分学者提出太古代加厚的洋壳主要以熔融或拆沉为主,而高温的地幔也只能引起浅俯冲作用(van Hunen and Moyen, 2012). 大量的计算模拟也显示,板块在高温条件下的俯冲时间仅几个兆年,将发生拆沉熔融(van Thienen *et al.*, 2004),明显不同于现代板块的长时间深俯冲过程。

英云闪长岩、花岗闪长岩和奥长花岗岩组合(TTG)是早期陆壳(24~28 亿年)的主要组成部分,与绿岩带共同构成太古宙克拉通的主体组合。它们具有轻、重稀土分异明显,低 Yb 高 Sr 含量的特征,与现代俯冲相关的埃达克岩类似(Rapp *et al.*, 2003). 相平衡实验研究显示,玄武岩质熔体在熔融过程中石榴石的分离结晶可以导致 TTG 熔体亏损 HREE,而金红石分离结晶则引起 TTG 熔体亏损 Nb、Ta(Xiong, 2006). 金红石的稳定压力大约在 1.5 GPa 以上,稳定温度随着水含量的减少而增加,而石榴石的稳定压力大约在 1.0 GPa 以上。因此,当石榴石和金红石发生分离结晶时,其熔体的形成压力要在 1.5 GPa 以上,这暗示 TTG 的母体岩浆形成深度大于 50 km,是含金红石榴辉岩在深俯冲过程中部分熔融的产物。然而,近期大量的模拟计算和高

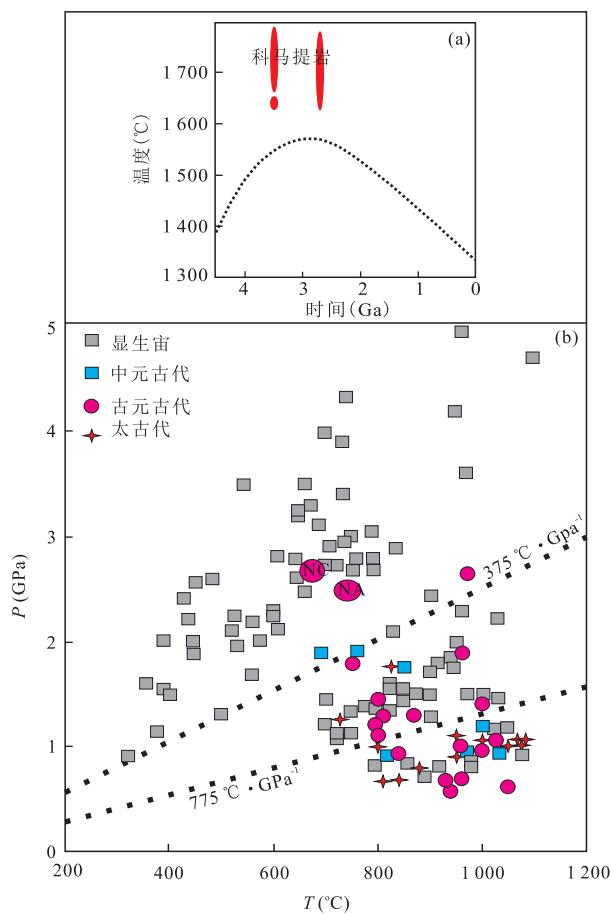


图 5 科马提岩与地幔潜能温度—时间分布及全球变质带峰期温压条件统计

Fig. 5 Distribution of time-temperature of komatiites (a) and a global compilation of peak pressure-temperature conditions of metamorphic belts (b)
底图据 van Thienen *et al.* (2004)、Herzberg *et al.* (2007) 和 Brown and Johnson (2018). a. 科马提岩与地幔潜能温度—时间分布;b. 全球变质带峰期温压条件统计图, NA、NC, 北美克拉通、华北克拉通(Xu *et al.*, 2018)

温高压实验提出,TTG 是地幔玄武岩质岩浆底侵作用导致下地壳基底变质岩石部分熔融的产物,熔融残留区有大量石榴石存在,所以导致 TTG 具有亏损 HREE 的特征(Smithies, 2000; Moyen and Martin, 2012). 更为重要的是,太古代的地幔温度明显高于现代地幔,其地幔地热梯度明显大于显生宙的 7~16 °C/km。张旗和翟明国(2012)根据相图发现,当太古代的地温梯度为 30 °C/km 时,即使当温度达到 1 200 °C,地热梯度线也仍然不能和石榴石晶出线相交,而在温度 900~1 050 °C 时,共生的矿物组合是斜长石和角闪石,稳定压力在 0.9~1.1 GPa 之间,类似于斜长角闪岩相。而当地温梯度为 25 °C/km 时,温度和压力分别约 900 °C 和 1.1 GPa,就会出现

斜长石、石榴石和角闪石,类似高压麻粒岩相的矿物组合。但目前太古宙还没有发现含石榴石的高压麻粒岩,俄罗斯报道的29亿年的榴辉岩(Mints *et al.*, 2010)也被新的研究证明是古元古代的变质产物(Liu *et al.*, 2017)。这说明太古宙TTG的熔融残留相可能为斜长角闪岩相,不会有石榴石出现。根据不同的石榴石+斜长石+角闪石+金红石组合和少量水的视剖面相图,Palin *et al.*(2016)提出太古宙TTG熔体可在800~950℃,碰撞加厚约40km的玄武质下地壳或洋壳底部熔融形成。他们认为地球早期的浅俯冲过程也可以形成TTG质岩石,这种浅俯冲过程不同于现代洋壳的低温深俯冲,在太古宙的高温地幔环境,洋壳在俯冲至30~40km后就会完全熔融。因此,对TTG的成因认识,并不能简单地与现代埃达克岩对比,两者形成的地热梯度完全不同。因此,3.0Ga的板块构造可能是浅俯冲,并不是现代真正意义上的深俯冲。

大量研究显示前寒武变质岩具有高的地温梯度(>375℃·GPa⁻¹,图5b),而变质带中的低地温梯度仅与显生宙现代俯冲作用有关(Brown and Johnson, 2018)。由于低温高压变质作用的缺乏,很多人认为现代样式的板块构造仅启动于1Ga(Stern, 2005; Brown, 2006)。Xu *et al.*(2018)在华北中部造山带的丰镇碳酸岩内识别出了极稀少的厘米级榴辉岩捕虏体(图3c)。它们主要由石榴石(~37%)、绿辉石(~36%)、蓝晶石(~9%)、石英(~9%)、黝帘石(~7%)和多硅白云母(~2%)组成,另外含有角闪石、黑云母、金红石等副矿物。石榴石具有明显的成分环带,从核部到边部,镁铝榴石组分增加而铁铝榴石组分减少,Mg/(Mg+Fe)比值从0.54升高到0.65,显示进变质过程。石榴石核部包裹了蓝晶石、石英、黝帘石、绿辉石、钙-钠闪石、钠闪石、钠云母、金红石等矿物,但是其边部却相对“干净”(图3d)。石榴石中的钙-钠闪石具有高Na含量(Na_B=0.5~0.7pfu),属于冻蓝闪石,与条带状钠云母共生,指示低温特征。绿辉石以基质和包体两种形式存在,其硬玉含量分别为23%±1%和27%±3%。黝帘石贫Fe³⁺,显示平行排列的片麻状构造,这是造山带榴辉岩的典型特征。多硅白云母具有高Si含量(3.40~3.44pfu),基质中的板状多硅白云母与石榴石和绿辉石共生,并包裹绿辉石和蓝晶石,这些矿物都代表峰期矿物组合。独居石以两种形式出现,一种是被石榴石包裹的早期矿物相,另一种与横穿石榴石的方解石细脉共生。对这两种独居石进行原位电

子探针定年得到两组不同的U-Th-Pb加权平均年龄,早、晚两期独居石的年龄分别为1839±26Ma和1766±7Ma,这限定了榴辉岩的峰期变质作用至少发生在古元古代(Xu *et al.*, 2018)。

综合电子探针分析结果和SEM-EDS面扫描获得各种矿物相的质量比例,Xu *et al.*(2018)获得了该榴辉岩的全岩成分(SiO₂=49.2%、Al₂O₃=20.1%、FeO=6.9%、MgO=10.2%、CaO=11.9%、Na₂O=0.99%),与大洋辉长岩组成相似。对榴辉岩内主要矿物进行原位激光分析显示,黝帘石富集轻稀土La(14×10^{-6} ~ 24×10^{-6})、Sr(3.574×10^{-6} ~ 3.988×10^{-6})、Th(2×10^{-6} ~ 10×10^{-6})、U(1×10^{-6} ~ 2×10^{-6})和Pb(10×10^{-6} ~ 1×10^{-6}),石榴石富集重稀土Y(13×10^{-6} ~ 31×10^{-6}),多硅白云母富集Rb(183×10^{-6} ~ 201×10^{-6})、Ba(2.428×10^{-6} ~ 2.564×10^{-6})。这3类矿物的化学组成控制了该榴辉岩的微量元素地球化学特征。研究也显示榴辉岩在俯冲进变质过程中,黝帘石、石榴石和多硅白云母控制全岩的微量元素组成(Korh *et al.*, 2009)。为了估计榴辉岩的峰期变质条件,通过基质中金红石的锆石温度计(Zack *et al.*, 2004)确定温度为650~670℃,相应的压力计(Tomkins *et al.*, 2007)获得压力为~2.5GPa;石榴石-单斜辉石温度计给出的温度为670℃;石榴石-单斜辉石-多硅白云母压力计给出的对应650℃和670℃温度的峰期压力分别为2.49GPa和2.46GPa(Waters and Martin, 1993)。各种温压计给出了一致的峰期压力(~2.5GPa)和峰期温度(650~670℃)。进一步在Na₂O-CaO-K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O饱和水条件下使用THERMOCALC(Powell *et al.*, 1998)程序计算得到P-T图解,通过绿辉石中的硬玉含量(22~24)等值线和多硅白云母中的Si含量(3.40~3.44)等值线,获得峰期矿物组合石榴石+绿辉石+蓝晶石在2.6~2.8GPa和650~670℃的稳定范围。这种峰期变质条件对应248±14℃·GPa⁻¹的低地温梯度,这是迄今记录的最“冷”的古元古代俯冲作用,其与许多在大洋俯冲带(<375℃·GPa⁻¹)折返的显生宙低温高压变质体类似。

丰镇榴辉岩的矿物组成和温压计均显示其代表古元古代的低温俯冲。碳酸岩的同位素研究也证实了它们来源于地幔俯冲沉积物的熔融作用。丰镇-怀安碳酸岩的δ¹⁸O_{V-SMOW}和δ¹³C_{V-PDB}值(分别为9.4‰~15.8‰和-5.7‰~-1.6‰)明显高于正常

地幔岩石($5\text{‰} \sim 8\text{‰}$ 和 $-7\text{‰} \sim -5\text{‰}$)和地幔初始碳酸岩($6\text{‰} \sim 10\text{‰}$ 和 $-8\text{‰} \sim -4\text{‰}$) (Xu *et al.*, 2014)。碳酸岩的氧同位素值可能已被后期作用改造,但碳同位素值相对不易受流体渗透和围岩同化等后期作用的影响。碳酸岩通常富含 REE 和 Sr, 其 Sr、Nd 同位素可以排除地壳物质的混染, 而保持地幔源区的组成(Nelson *et al.*, 1988)。丰镇—怀安的碳酸岩具有极低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($-5.8 \sim -7.8$)和相对较高的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值($0.7028 \sim 0.7037$) (Xu *et al.*, 2018)。而怀安古元古代高压麻粒岩(1.82 Ga)的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 2.8 (郭敬辉等, 1993), 明显高于碳酸岩, 这说明古元古代下地壳的拆沉作用并不能为地幔源区提供富集的 Nd 同位素组成。丰镇碳酸岩相对原始地幔的微量元素组成特征也显示 Pb 的负异常(Feng *et al.*, 2016), 排除了在岩浆迁移过程中地壳物质的混染。因此, 碳酸岩的地幔源区含有俯冲的地壳物质。这也证实了华北丰镇—怀安地区存在古元古代的现代板块深俯冲作用。

在全球范围内, 古元古代低温俯冲作用最近在西非和北美克拉通也有报道。华北中部造山带内古元古代碳酸岩及其榴辉岩捕虏体的发现直接将碳酸岩和“冷”的板片俯冲作用联系了起来。图 1 展示了全球古元古代碳酸岩与造山带内古元古代麻粒岩与榴辉岩的分布情况。碳酸岩与古元古代造山带中的高压变质岩石有着紧密的联系。虽然至今只有 3 处古元古代低地温梯度被报道, 但是“冷”的深俯冲作用可能在古元古代非常普遍, 只是全球的低温记录可能很容易被后来陆内碰撞所产生的高温变质作用覆盖。因此, 笔者认为全球范围的现代板块构造至少启动于古元古代, 这也为哥伦比亚超大陆的形成提供了支持证据。哥伦比亚超大陆几乎包含了地球上所有的陆块(Zhao *et al.*, 2004), 它可能是威尔逊循环的产物(Wilson, 1966), 超大陆的拼合导致了深俯冲作用和洋壳的闭合。

4 结论

华北丰镇—怀安古元古代碳酸岩与同时代碱性岩、I型和 A型花岗岩以及高压麻粒岩密切共生, 指示其形成于造山环境。造山型碳酸岩内超硅石榴石包体和榴辉岩捕虏体的发现, 为研究岩浆起源深度、现代板块构造启动以及壳幔作用提供了天然的实验室。全球范围的古元古代俯冲作用可能为地表沉积物进入到古老的地球深部提供了高效的途径。对洋

岛玄武岩进行的同位素和微量元素地球化学研究, 多年来一直被用于推测地幔深部长期($1 \sim 2\text{ Ga}$)存在的由俯冲作用导致洋壳及各种海洋沉积物再循环所产生的组分不均一性(Hofmann, 1997)。然而, 由于古老的板块俯冲作用缺乏岩石学证据, 这种推测依然存在争论。碳酸岩内榴辉岩捕虏体的研究不仅为古元古代深俯冲作用提供了直接证据, 同时也表明再循环的碳酸盐可能在改变深部地幔局部氧化还原状态、产生地幔组分不均一性和形成富 Fe^{3+} 超硅石榴石的过程中扮演了重要角色。再循环碳酸盐的熔融还能产生富集大离子亲石元素和同位素的流体, 这种流体是重要的地幔交代介质。

致谢: 非常感谢在论文撰写过程中得到了西北大学张宏福院士的鼓励, 同时感谢两位匿名审稿人在评审过程给本文提出的宝贵意见。

References

- Agard, P., Yamato, P., Jolivet, L., et al., 2009. Exhumation of Oceanic Blueschists and Eclogites in Subduction Zones: Timing and Mechanisms. *Earth-Science Reviews*, 92 (1–2): 53–79.
- Bell, K., Keller, J., 1995. Carbonatite Volcanism: Ol Doinyo Lengai and the Petrogenesis of Natrocarbonatites. Springer, Berlin.
- Belousova, E.A., Kostitsyn, Y.A., Griffin, W.L., et al., 2010. The Growth of the Continental Crust: Constraints from Zircon Hf-Isotope Data. *Lithos*, 119(3–4): 457–466.
- Brown, M., 2006. Duality of Thermal Regimes is the Distinctive Characteristic of Plate Tectonics since the Neoarchean. *Geology*, 34(11): 961–964.
- Brown, M., Johnson, T., 2018. Secular Change in Metamorphism and the Onset of Global Plate Tectonics. *American Mineralogist*, 103(2): 181–196.
- Collerson, K.D., Williams, Q., Kamber, B.S., et al., 2010. Majoritic Garnet: A New Approach to Pressure Estimation of Shock Events in Meteorites and the Encapsulation of Sub-Lithospheric Inclusions in Diamond. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(20): 5939–5957.
- Condie, K.C., 2011. Earth as an Evolving Planetary System. Academic Press, Amsterdam.
- Dasgupta, R., Hirschmann, M. M., 2006. Melting in the Earth's Deep Upper Mantle Caused by Carbon Dioxide. *Nature*, 440(7084): 659–662.
- Dasgupta, R., Mallik, A., Tsuno, K., et al., 2013. Carbon-Dioxide-Rich Silicate Melt in the Earth's Upper Mantle. *Nature*, 493(7431): 211–215.
- Dhuime, B., Storey, C.D., 2012. A Change in the Geodynamics

- of Continental Growth 3 Billion Years Ago. *Science*, 335 (6074): 1334–1336.
- Dobson, D. P., Jones, A. P., Rabe, R., et al., 1996. In-Situ Measurement of Viscosity and Density of Carbonate Melts at High Pressure. *Earth and Planetary Science Letters*, 143(1–4): 207–215.
- Feng, M., Xu, C., Kynicky, J., et al., 2016. Rare Earth Element Enrichment in Palaeoproterozoic Fengzhen Carbonatite from the North China Block. *International Geology Review*, 58(15): 1940–1950.
- Fischer, T. P., Burnard, P., Marty, B., et al., 2009. Upper-Mantle Volatile Chemistry at Oldoinyo Lengai Volcano and the Origin of Carbonatites. *Nature*, 459 (7243): 77–80.
- Foley, S. F., Buhre, S., Jacob, D. E., 2003. Evolution of the Archaean Crust by Delamination and Shallow Subduction. *Nature*, 421(6920): 249–252.
- Frost, D. J., McCammon, C. A., 2008. The Redox State of Earth's Mantle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 36(1): 389–420.
- Gaillard, F., Malki, M., Iacono-Marziano, G., et al., 2008. Carbonatite Melts and Electrical Conductivity in the Asthenosphere. *Science*, 322(5906): 1363–1365.
- Genge, M. J., Price, G. D., Jones, A. P., 1995. Molecular Dynamics Simulations of CaCO₃ Melts to Mantle Pressures and Temperatures: Implications for Carbonatite Magmas. *Earth and Planetary Science Letters*, 131(3–4): 225–238.
- Greber, N. D., Dauphas, N., Bekker, A., et al., 2017. Titanium Isotopic Evidence for Felsic Crust and Plate Tectonics 3.5 Billion Years Ago. *Science*, 357(6357): 1271–1274.
- Guo, J. H., Zhai, M. G., Zhang, Y. G., et al., 1993. Early Precambrian Manjinggou High-Pressure Granulite Melange Belt on the South Edge of the Huainan Complex, North China Craton: Geological Features, Petrology and Isotopic Geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 9(4): 329–341 (in Chinese with English abstract).
- Hawkesworth, C. J., Kemp, A. I. S., 2006. Using Hafnium and Oxygen Isotopes in Zircons to Unravel the Record of Crustal Evolution. *Chemical Geology*, 226(3–4): 144–162. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.09.018>
- Herzberg, C., Asimow, P. D., Arndt, N., et al., 2007. Temperatures in Ambient Mantle and Plumes: Constraints from Basalts, Picrites, and Komatiites. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 8(2): Q02006.
- Höfer, H. E., Brey, G. P., Schulz-Dobrick, B., et al., 1994. The Determination of the Oxidation State of Iron by the Electron Microprobe. *European Journal of Mineralogy*, 6(3): 407–418. <https://doi.org/10.1127/ejm/6/3/0407>
- Hofmann, A. W., 1997. Mantle Geochemistry: The Message from Oceanic Volcanism. *Nature*, 385(6613): 219–229.
- Hofmeister, A. M., Giestling, P. A., Wopenka, B., et al., 2004. Vibrational Spectroscopy of Pyrope–Majorite Garnets: Structural Implications. *American Mineralogist*, 89(1): 132–146. <https://doi.org/10.2138/am-2004-0116>
- Irifune, T., Sekine, T., Ringwood, A. E., et al., 1986. The Eclogite–Garnetite Transformation at High Pressure and Some Geophysical Implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 77(2): 245–256. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(86\)90165-2](https://doi.org/10.1016/0012-821x(86)90165-2)
- Jacob, D. E., 2004. Nature and Origin of Eclogite Xenoliths from Kimberlites. *Lithos*, 77(1–4): 295–316. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.03.038>
- Jahn, B. M., Caby, R., Monie, P., 2001. The Oldest UHP Eclogites of the World: Age of UHP Metamorphism, Nature of Protoliths and Tectonic Implications. *Chemical Geology*, 178(1–4): 143–158. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(01\)00264-9](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(01)00264-9)
- Kiseeva, E. S., Yaxley, G. M., Stepanov, A. S., et al., 2013. Metapyroxenite in the Mantle Transition Zone Revealed from Majorite Inclusions in Diamonds. *Geology*, 41(8): 883–886.
- Kiseeva, E. S., Wood, B. J., Ghosh, S., et al., 2016. The Pyroxenite–Diamond Connection. *Geochemical Perspectives Letters*, 2(1): 1–9.
- Korh, A. E., Schmidt, S. T., Ulianov, A., et al., 2009. Trace Element Partitioning in HP-LT Metamorphic Assemblages during Subduction-Related Metamorphism, Ile de Groix, France: A Detailed LA-ICPMS Study. *Journal of Petrology*, 50(6): 1107–1148.
- Labrosse, S., Jaupart, C., 2007. Thermal Evolution of the Earth: Secular Changes and Fluctuations of Plate Characteristics. *Earth and Planetary Science Letters*, 260(3–4): 465–481.
- Li, S. Z., Dai, L. M., Zhang, Z., et al., 2015. Precambrian Geodynamics (III): General Features of Precambrian Geology. *Earth Science Frontiers*, 22(6): 27–45 (in Chinese with English abstract).
- Litasov, K., Ohtani, E., 2010. The Solidus of Carbonated Eclogite in the System CaO-Al₂O₃-MgO-SiO₂-Na₂O-CO₂ to 32 GPa and Carbonatite Liquid in the Deep Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 295(1–2): 115–126.
- Li, F. L., Zhang, L. F., Li, X. L., et al., 2017. The Metamorphic Evolution of Paleoproterozoic Eclogites in Kuravaara, Northern Belomorian Province, Russia: Con-

- straints from *P-T* Pseudosections and Zircon Dating. *Precambrian Research*, 289:31–47.
- Maruyama, S., Liou, J.G., Terabayashi, M., 1996. Blueschists and Eclogites of the World and Their Exhumation. *International Geology Review*, 38(6):485–594.
- McCammon, C., 2005. The Paradox of Mantle Redox. *Science*, 308 (5723): 807 – 808. <https://doi.org/10.1126/science.1110532>
- Mints, M. V., Belousova, E. A., Konilov, A. N., et al., 2010. Mesoarchean Subduction Processes: 2.87 Ga Eclogites from the Kola Peninsula, Russia. *Geology*, 38 (8): 739–742.
- Moyen, J.F., Martin, H., 2012. Forty Years of TTG Research. *Lithos*, 148(148):312–336.
- Nakatsuka, A., Yoshiasa, A., Yamanaka, T., et al., 1999. Symmetry Change of Majorite Solid-Solution in the System $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$ - $MgSiO_3$. *American Mineralogist*, 84(7–8):1135–1143.
- Nelson, D.R., Chivas, A.R., Chappell, B.W., et al., 1988. Geochemical and Isotopic Systematics in Carbonatites and Implications for the Evolution of Ocean-Island Sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(1):1–17.
- Palin, R.M., White, R.W., Green, E.C.R., 2016. Partial Melting of Metabasic Rocks and the Generation of Tonalitic-Trondhjemite-Granodioritic (TTG) Crust in the Archaean: Constraints from Phase Equilibrium Modelling. *Precambrian Research*, 287: 73 – 90. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.11.001>
- Powell, R., Holland, T., Worley, B., 1998. Calculating Phase Diagrams Involving Solid Solutions via Non-Linear Equations, with Examples Using THERMOCALC. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(4):577–588.
- Rapp, R. P., Shimizu, N., Norman, M. D., 2003. Growth of Early Continental Crust by Partial Melting of Eclogite. *Nature*, 425(6958):605–609.
- Rohrbach, A., Ballhaus, C., Golla-Schindler, U., et al., 2007. Metal Saturation in the Upper Mantle. *Nature*, 449 (7161):456–458.
- Scambelluri, M., Pettke, T., van Roermund, H. L. M., 2008. Majoritic Garnets Monitor Deep Subduction Fluid Flow and Mantle Dynamics. *Geology*, 36(1):59–62.
- Shirey, S.B., Richardson, S.H., 2011. Start of the Wilson Cycle at 3 Ga Shown by Diamonds from Subcontinental Mantle. *Science*, 333(6041):434–436.
- Smithies, R. H., 2000. The Archaean Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite (TTG) Series is not an Analogue of Cenozoic Adakite. *Earth and Planetary Science Letters*, 182 (1):115–125.
- Stein, M., Hofmann, A.W., 1994. Mantle Plumes and Episodic Crustal Growth. *Nature*, 372(6501):63–68.
- Stern, R.J., 2005. Evidence from Ophiolites, Blueschists, and Ultrahigh-Pressure Metamorphic Terranes That the Modern Episode of Subduction Tectonics Began in Neoproterozoic Time. *Geology*, 33(7):557–560.
- Sweeney, R. J., 1994. Carbonatite Melt Compositions in the Earth's Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 128(3–4):259–270.
- Tang, M., Chen, K., Rudnick, R. L., 2016. Archean Upper Crust Transition from Mafic to Felsic Marks the Onset of Plate Tectonics. *Science*, 351(6271):372–375.
- Tao, R.B., Fei, Y.W., Bullock, E.S., et al., 2018. Experimental Investigation of Fe^{3+} -Rich Majoritic Garnet and Its Effect on Majorite Geobarometer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 225:1–16.
- Thomson, A.R., Walter, M.J., Kohn, S.C., et al., 2016. Slab Melting as a Barrier to Deep Carbon Subduction. *Nature*, 529(7584):76–79.
- Tomkins, H. S., Powell, R., Ellis, D. J., 2007. The Pressure Dependence of the Zirconium-in-Rutile Thermometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(6):703–713.
- Trap, P., Faure, M., Lin, W., et al., 2009. The Zanhuan Massif, the Second and Eastern Suture Zone of the Paleoproterozoic Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 172(1–2):80–98.
- Treiman, A. H., Schedl, A., 1983. Properties of Carbonatite Magma and Processes in Carbonatite Magma Chambers. *The Journal of Geology*, 91(4): 437 – 447. <https://doi.org/10.1086/628789>
- van der Hist, R., Engdahl, R., Spakman, W., et al., 1991. Tomographic Imaging of Subducted Lithosphere below Northwest Pacific Island Arcs. *Nature*, 353(6339):37–43. <https://doi.org/10.1038/353037a0>
- van Hunen, J., Moyen, J.F., 2012. Archean Subduction: Fact or Fiction?. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40(1):195–219. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105255>
- van Thienen, P., Vlaar, N.J., van den Berg, A.P., 2004. Plate Tectonics on the Terrestrial Planets. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 142 (1 – 2): 61 – 74. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2003.12.008>
- Walter, M.J., Bulanova, G. P., Armstrong, L. S., et al., 2008. Primary Carbonatite Melt from Deeply Subducted Oceanic Crust. *Nature*, 454 (7204): 622 – 625. <https://doi.org/10.1038/nature07132>
- Waters, D.J., Martin, H.N., 1993. Geobarometry of Phengite-Bearing Eclogites. *Terra Abstracts*, 5:410–411.

- Wilson, J. T., 1966. Did the Atlantic Close and Then Reopen?. *Nature*, 211(5050): 676–681.
- Wood, B.J., Kiseeva, E.S., Matzen, A.K., 2013. Garnet in the Earth's Mantle. *Elements*, 9(6): 421–426. <https://doi.org/10.2113/gselements.9.6.421>
- Woolley, A. R., Kjarsgaard, B. A., 2008. Carbonatite Occurrences of the World: Map and Database. Geological Survey of Canada, Open File, 5796.
- Wyllie, P. J., 1989. Origin of Carbonatites: Evidence from Phase Equilibrium Studies. In: Bell, K., ed., Carbonatites: Genesis and Evolution. Unwin Hyman, London, 500–545.
- Xiong, X. L., 2006. Trace Element Evidence for Growth of Early Continental Crust by Melting of Rutile-Bearing Hydrous Eclogite. *Geology*, 34(11): 945–948. <https://doi.org/10.1130/g22711a.1>
- Xu, C., Chakhmouradian, A.R., Taylor, R.N., et al., 2014. Origin of Carbonatites in the South Qinling Orogen: Implications for Crustal Recycling and Timing of Collision between the South and North China Blocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 143: 189–206. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.03.041>
- Xu, C., Kynicky, J., Song, W.L., et al., 2018. Cold Deep Subduction Recorded by Remnants of a Paleoproterozoic Carbonated Slab. *Nature Communications*, 9: 2790. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05140-5>
- Xu, C., Kynicky, J., Tao, R.B., et al., 2017. Recovery of an Oxidized Majorite Inclusion from Earth's Deep Asthenosphere. *Science Advances*, 3(4): e1601589. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601589>
- Xu, C., Zeng, L., Song, W.L., et al., 2017. Orogenic Carbonatite Petrogenesis and Deep Carbon Recycle. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(2): 213–221, 183 (in Chinese with English abstract).
- Zack, T., Moraes, R., Kronz, A., 2004. Temperature Dependence of Zr in Rutile: Empirical Calibration of a Rutile Thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(4): 471–488. <https://doi.org/10.1007/s00410-004-0617-8>
- Zeng, L., Xu, C., Li, Y.X., et al., 2017. Petrogenesis and Tectonic Implication of Paleoproterozoic Granites and Granulites in the Fengzhen Area of North China Craton. *Precambrian Research*, 302: 298–311. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.10.015>
- Zhang, Q., Zhai, M.G., 2012. What is the Archean TTG? *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3446–3456 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2004. A Paleo-Mesoproterozoic Supercontinent: Assembly, Growth and Breakup. *Earth-Science Reviews*, 67(1–2): 91–123. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.02.003>
- 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): 45–73. doi: 10.1016/S0301-9268(00)00154-6
- Zhao, G.C., Wilde, S.A., Cawood, P.A., et al., 2002. SHRIMP U-Pb Zircon Ages of the Fuping Complex: Implications for Late Archean to Paleoproterozoic Accretion and Assembly of the North China Craton. *American Journal of Science*, 302(3): 191–226. <https://doi.org/10.2475/ajs.302.3.191>
- Zhou, L.G., Zhai, M.G., Lu, J.S., et al., 2017. Paleoproterozoic Metamorphism of High-Grade Granulite Facies Rocks in the North China Craton: Study Advances, Questions and New Issues. *Precambrian Research*, 303: 520–547. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.06.025>

附中文参考文献

- 郭敬辉,翟明国,张毅刚,等,1993.怀安蔓菁沟早前寒武纪高压麻粒岩混杂岩带地质特征、岩石学和同位素年代学. *岩石学报*, 9(4): 329–341.
- 李三忠,戴黎明,张臻,等,2015.前寒武纪地球动力学(Ⅲ):前寒武纪地质基本特征.地学前缘,22(6): 27–45.
- 许成,曾亮,宋文磊,等,2017.造山带碳酸岩起源与深部碳循环. *矿物岩石地球化学通报*, 36(2): 213–221, 183.
- 张旗,翟明国,2012.太古宙 TTG 岩石是什么含义? *岩石学报*, 28(11): 3446–3456.