

文章编号:1672-6561(2012)04-0001-11

华北克拉通东南缘前寒武纪下地壳的幕式生长与多期改造:岩石学、年代学和 Hf 同位素证据

刘贻灿^{1,2}, 王安东^{1,2}

(1. 中国科学院 壳幔物质与环境重点实验室, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

摘要:早前寒武纪被认为是大陆地壳形成的重要时期。华北克拉通东南缘前寒武纪下地壳岩石主要以变质基底(五河变质杂岩)和中生代闪长/二长闪长质斑岩中包体形式存在,它们为研究该地区前寒武纪下地壳的形成和演化提供了极好的天然实验室。近期的变质岩石学、岩石地球化学、Hf 同位素及锆石 U-Pb 年代学研究表明:该区前寒武纪下地壳经历了幕式地壳生长与多期改造。强烈的构造-热事件和变质改造时间集中于 2.5~2.6、2.1、1.8~1.9 Ga 以及 390、176 Ma。其中,形成于 2.5~2.6 Ga 的下地壳岩石,一部分经历了 2.1 Ga 和(或)1.8~1.9 Ga 高压麻粒岩相变质作用以及 390、176 Ma 的变质改造,类似于形成于 2.1 Ga 并经历了 1.8 Ga 高压麻粒岩相变质作用的岛弧成因的下地壳岩石,表现为高放射成因 Pb 同位素组成;另一部分岩石则形成于 2.55~2.64 Ga,可能因处于下地壳上部而仅遭受了 2.48~2.49 Ga 麻粒岩相变质作用,但没有 2.1 Ga 和(或)1.8~1.9 Ga 变质叠加的岩石学和年代学记录,表现为典型前寒武纪下地壳岩石特点的低放射成因 Pb 同位素组成。2.7~2.8 Ga 的继承锆石 U-Pb 年龄和锆石 Hf 模式年龄暗示研究区可能还存在更早的地壳生长时期,但尚需进一步研究。

关键词:锆石;U-Pb 年代学;Hf 同位素;麻粒岩相变质作用;下地壳;幕式生长;前寒武纪;华北克拉通
中图分类号:P588.3 **文献标志码:**A

Episodic Growth and Multiple Modification of Precambrian Lower Crust in the Southeastern Margin of North China Craton: Petrologic, Geochronological and Hf-isotopic Evidences

LIU Yi-can^{1,2}, WANG An-dong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Crust-mantle Materials and Environments, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, Anhui, China; 2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

Abstract: The early Precambrian is regarded to be a crucial stage for continental crust formation. The Precambrian lower-crustal rocks in the southeastern margin of North China Craton occur as the exposed metamorphic basement (named as the Wuhe metamorphic complex) and xenoliths in the Mesozoic dioritic to monzodioritic porphyry. These rocks provide an excellent natural laboratory to study formation and evolution of the Precambrian lower crust in the region. Integrated investigations on metamorphic petrology, petrologic geochemistry, Hf-isotope and zircon U-Pb geochronology of the rocks suggested that the Precambrian lower crust beneath the

收稿日期:2012-08-25

基金项目:国家自然科学基金项目(40634023,40973043);国家自然科学基金重点项目(90814008)

作者简介:刘贻灿(1962-),男,安徽潜山人,教授,博士研究生导师,E-mail:liuyc@ustc.edu.cn.

studied region experienced an episodic growth and multiple modification history. Intensive tectono-thermo events and metamorphic overprinting mainly occurred at several peaks, such as 2.5–2.6, 2.1, 1.8–1.9 Ga and 390, 176 Ma. For the 2.5–2.6 Ga lower-crustal rocks, some of them with high radiogenic Pb-isotopic compositions, which were similar to those formed at 2.1 Ga subduction-related arc setting and underwent 1.8 Ga high-pressure granulite-facies metamorphism, suffered from high-pressure granulite-facies metamorphism at 2.1 Ga and(or) 1.8–1.9 Ga, and subsequent metamorphic overprinting at 390 Ma and 176 Ma; however, others had low radiogenic Pb-isotopic compositions for typical Precambrian lower-crustal rocks, and formed at 2.55–2.64 Ga and underwent 2.48–2.49 Ga peak metamorphism of granulite-facies without record of post-peak metamorphic overprint at 2.1 Ga and(or) 1.8–1.9 Ga. Therefore, they formed simultaneously, but probably located at different crustal levels and escaped from subsequent metamorphic overprinting, strongly depending on their formation depths. The 2.7–2.8 Ga ages defined by inherited zircons and depleted mantle zircon-Hf model ages could record an earlier crustal growth episode in the area.

Key words: zircon; U-Pb geochronology; Hf-isotope; granulite-facies metamorphism; lower crust; episodic growth; Precambrian; North China Craton

0 引言

大陆地壳的形成一般归结为 2 个典型的板块构造位置,即活动大陆边缘和板内^[1]。其中,板内的大陆生长与地幔柱的岩浆板底垫托作用或岩浆底侵作用(magmatic underplating)有关,而板缘的大陆生长则主要通过俯冲增生和弧-陆碰撞来实现的。而且,会聚大陆边缘通常被认为是下地壳增生(包括幔源岩浆板底垫托作用和俯冲增生)的主要场所^[2]。然而,很少有实例是来自活动大陆边缘的下地壳包体^[2–3]。

麻粒岩包体和麻粒岩地体(尤其是高压麻粒岩)通常被认为是透视下地壳的窗口^[2]。高压麻粒岩通常被认为代表高级的变基性岩,并以单斜辉石+斜长石+石榴子石+石英等矿物组合为主要特征^[4–6],至于其他次要矿物如角闪石和蓝晶石等是否出现,取决于水活度和全岩成分^[7]。高压麻粒岩不同于榴辉岩的是其矿物组合中含有斜长石和(或)贫硬玉分子的单斜辉石,而中压麻粒岩不同于高压麻粒岩的主要特征是其矿物组合中含有斜方辉石,但是高压麻粒岩在峰期之后减压过程中可能会形成以后成合晶冠状体形式存在的斜方辉石^[7]。高压麻粒岩出露相当广泛,从古元古代(如华北恒山杂岩^[8])到新生代(如喜马拉雅山脉)的诸多大陆碰撞造山带中均有报道。前人研究结果显示,当变质温度超过 800 °C 时,变质压力可能超过 1.4 GPa^[9],这意味着加厚地壳(或俯冲地壳)的下部经历了高温作用。另外,高压麻粒岩有时也与中温榴辉岩共生,如华力西造山

带^[9]。在特定地带鉴定出高压麻粒岩有助于对涉及大陆碰撞及相关过程中下地壳演化的认识,而对高压麻粒岩相变质作用的岩石学观察和年代学测定对理解变质作用和下地壳演化之间的关系至关重要。但是,获得精确的高压麻粒岩相变质作用的时代往往比较困难。这种困难主要来自于后期多阶段变质作用叠加以及相关过程导致的矿物间同位素体系(尤其是 Sm-Nd 和 Rb-Sr)的重置或不平衡,因此影响了对岩石的形成过程和构造背景的认识。

在过去的 20 年里,众多研究者对华北克拉通前寒武纪变质基底和下地壳包体岩石开展了大量的岩石学、构造地质学、地球化学和地质年代学研究,并在其形成和演化上获得了若干重要进展,进一步将华北克拉通变质基底划分为东部陆块、西部陆块及分割东部和西部陆块的中部造山带^[10–11]。目前就东、西部陆块沿中部造山带在大约 1.85 Ga 完成克拉通拼合已经达成共识^[10–17]。拼合完成之后,在 1.6~1.85 Ga 期间,克拉通内部和边缘经历了一系列的拉张和裂谷事件,形成了伴随有镁铁质岩浆群侵位的拗拉槽和边缘裂谷盆地,发育有斜长岩-辉长岩-纹长二长岩-环斑花岗岩套和 A 型花岗岩,以及超钾火山岩的喷发^[17–22]。值得注意的是,目前已报道的古元古代高压麻粒岩相变质作用主要来自于中部造山带^[8,10–13,23],而东部陆块仅在胶东和信阳地区见有零星报道^[24]。此外,对华北克拉通古元古代高压麻粒岩相变质作用的构造背景还存在 2 种不同的解释:一种观点认为这些高压麻粒岩形成于东、西部

陆块拼合的碰撞-造山环境中^[8,11-14];另一种观点则认为它们是古元古代地幔柱活动的产物^[18-20,24]。存在争议的一个重要原因是对于高压麻粒岩相变质作用缺少直接的岩石学和年代学观察,尤其是在华北克拉通东南缘或东部陆块的南部。目前,在所研究的区域,仅见高压麻粒岩相变质作用的岩石学证据和模糊的(晚)古元古代年龄的分开报道。最近,Xu 等在徐州—宿州地区发现了榴辉岩(类)捕虏体,认为它们是华北克拉通镁铁质下地壳在大约 220 Ma 时构造加厚形成的^[25-27]。

关于华北克拉通的形成与演化,虽然受到广泛关注并日益引起国内外研究者的兴趣,但是大部分研究都集中于华北克拉通内部、北部和东、西陆块结合带或中部造山带,而东南缘下地壳的形成与演化研究则显得较薄弱。华北克拉通东南缘出露的变质基底(五河变质杂岩)和下地壳包体岩石无疑为这一研究提供了极好的天然实验室。最近的研究结果显示,五河变质杂岩中的变基性岩经历了 1.80~1.90 Ga 的高压麻粒岩相变质作用^[28-29]。徐州—宿州一带中生代侵入体中包体的岩石学、年代学和岩石地球化学研究也表明,这些包体大部分形成于 2.4~2.5 Ga 并经过大约 1.8 Ga 高压麻粒岩相变质作用^[25-29]。但是,有关研究区下地壳岩石的成因、形成与演化仍是亟待解决的重要科学问题。

为了更好地了解华北克拉通东南缘前寒武纪地壳(尤其是下地壳)的形成和演化过程,笔者根据近年来对蚌埠地区出露的前寒武纪变质基底和宿州附近夹沟中生代闪长斑岩中捕虏体的研究成果和进展,结合研究区已发表的相关资料,总结了华北克拉通东南缘前寒武纪幕式地壳生长和多期变质作用与改造的岩石学和年代学证据。

1 地质背景

华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一,保留有大于 3.6 Ga 的古老地壳物质残留^[30]。地理位置上,华北克拉通西接祁连造山带,北邻天山—内蒙—大兴安岭造山带;在南端,秦岭—大别—苏鲁造山带把华北克拉通和扬子克拉通分开(图 1^[26])。基于年代学、岩石组合、构造演化和 P-T-t 轨迹的不同,将华北克拉通划分为东部陆块、西部陆块及夹于其中的中部造山带^[8,10,19,31]。笔者研究的蚌埠和徐州—宿州地区位于华北克拉通东部陆块的东南缘,距苏鲁造山带西端的郯—庐断裂带以西约 100 km,距大别造山带北端约 300 km(图 1)。区内变形的

新元古代和古生代盖层,以及晚太古代到古元古代的变质基底侵入有大量小的中生代侵入体(如夹沟、班井和利国岩体;图 1)。这些中生代侵入体主要由闪长质和二长闪长质斑岩组成。研究区的前寒武纪变质基底主要出露在蚌埠地区(常称为“五河变质杂岩”或“五河群”^[32]),并且被中生代含石榴子石花岗岩所侵入[图 2(a)];而中生代侵入体中含有大量下地壳或幔源包体或捕虏体^[25-26,29,33-34][图 2(b)]的徐州—宿州地区则无变质基底出露。近期研究表明,变质基底出露区(荆山、怀远和凤阳等地)发育的含石榴子石花岗岩主要是由华南三叠纪俯冲陆壳岩石在 159 Ma 左右发生部分熔融形成的^[35-36]。

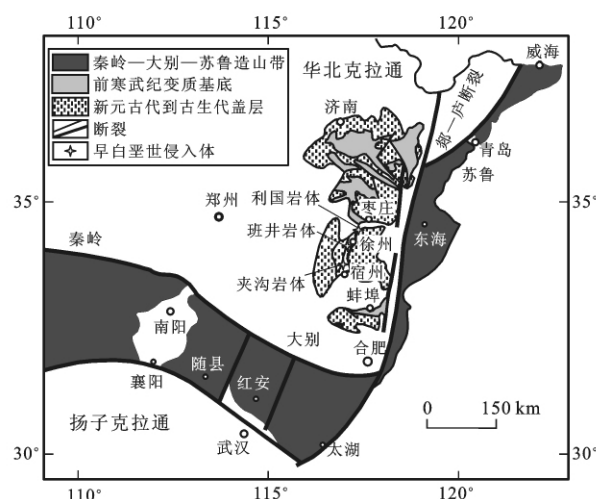


图 1 秦岭—大别—苏鲁碰撞带及华北克拉通东南缘相邻地区地质简图

Fig. 1 Simplified Geological Map of Qinling-Dabie-Sulu Collision Zone and Adjacent Parts of the Southeastern North China Craton

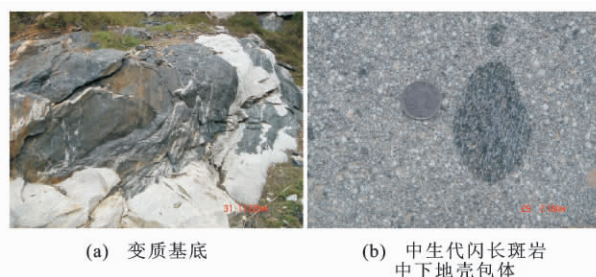


图 2 华北克拉通东南缘变质基底和中生代闪长斑岩中下地壳包体的野外照片

Fig. 2 Photographs Showing the Field Occurrence of Metamorphosed Basement Rocks and Lower-crustal Xenoliths in the Mesozoic Dioritic Porphyry in the Southeastern Margin of North China Craton

研究区变质基底的岩石类型主要有(含石榴)斜长角闪岩、榴闪岩、石榴麻粒岩和片麻岩等;下地壳

包体的岩石类型主要有(含石榴)斜长角闪岩、榴闪岩、石榴角闪石岩、石榴麻粒岩、含石榴角闪斜长片麻岩和花岗片麻岩等。此外,包体中还有含尖晶石石榴单斜辉石岩、含金云母单斜辉石岩和含尖晶石二辉石岩等形成于古生代((393±7) Ma)的幔源岩石,指示北秦岭向东延伸到华北克拉通东南缘(至少到安徽宿州地区)以及在华北克拉通与扬子克拉通之间存在一个已消失的新元古代洋壳^[33]。

2 多期变质作用与改造的岩石学证据

研究区前寒武纪变质基底岩石(五河变质杂岩),主要出露于“蚌埠隆起”区(如荆山、怀远和凤阳等地),岩石类型主要有含石榴斜长角闪岩、榴闪岩、石榴麻粒岩和片麻岩等。石榴斜长角闪岩呈构造岩块或条带状产于不纯的大理岩中^[29,34-36],两者之间呈构造接触关系,反映了它们原岩的不同以及可能具有不同的演化历史,它们的原岩分别为岩浆岩和沉积岩。石榴斜长角闪岩(如样品 07FY01)主要由石榴子石、斜长石和角闪石以及少量单斜辉石、榍石和微量金红石等矿物组成(图 3(a)、(c)^[29])。石榴子石在成分上是均一的,为铁铝榴石-镁铝榴石-钙铝榴石固溶体,锰含量较低。斜长石有 3 种产出形

式:以包裹体形式产于石榴子石中;以后成合晶形式与绿角闪石共生;以基质形式产出。富钛的棕色角闪石通常以包裹体形式产于斜长石[图 3(b)^[29]]或基质中, TiO₂ 含量(质量分数,后文同)高达 3.82%;而产于基质中或与斜长石共生产于后成合晶中[图 3(c)]的绿色角闪石几乎不含 Ti。基质中残留的单斜辉石为透辉石。榴闪岩[图 3(d)、(e)]主要由石榴子石、角闪石、斜长石和石英等组成,石榴子石在成分上相对均一,类似于样品 07FY01 的石榴子石组成;角闪石有 2 期,分别为早期的棕色高钛角闪石和晚期的绿色低钛角闪石,这些特征暗示榴闪岩样品也经历了类似的高压麻粒岩相变质作用及后期变质作用叠加。石榴麻粒岩的主要矿物组合为石榴子石+单斜辉石+斜长石+角闪石[图 3(f)],这种矿物组合指示其经历了高压麻粒岩相变质作用^[4-6]。

研究区下地壳包体的岩石类型很丰富,如(含石榴)斜长角闪岩、榴闪岩、石榴角闪石岩、石榴麻粒岩、含石榴角闪斜长片麻岩和花岗片麻岩等(图 4^[29,33])。其中,石榴斜长角闪岩(如样品 07JG12)主要组成矿物为石榴子石、斜长石、角闪石、金红石、石英以及少量单斜辉石[图 4(b)、(d)、(e)]。石榴子石晶体在尺度上为毫米级别,成分相

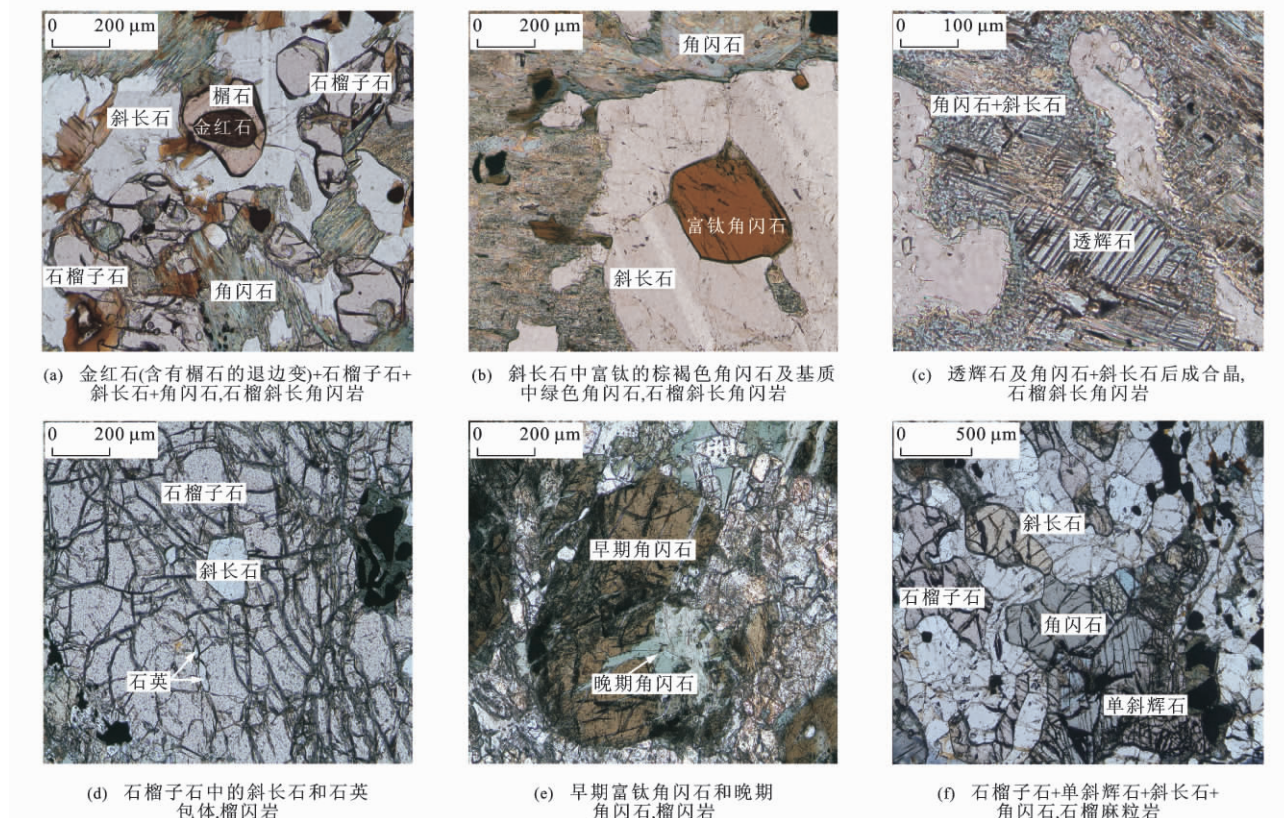


图 3 华北克拉通变质基底岩石的显微照片

Fig. 3 Photomicrographs of the Metamorphosed Basement Rocks from the Southeastern Margin of North China Craton

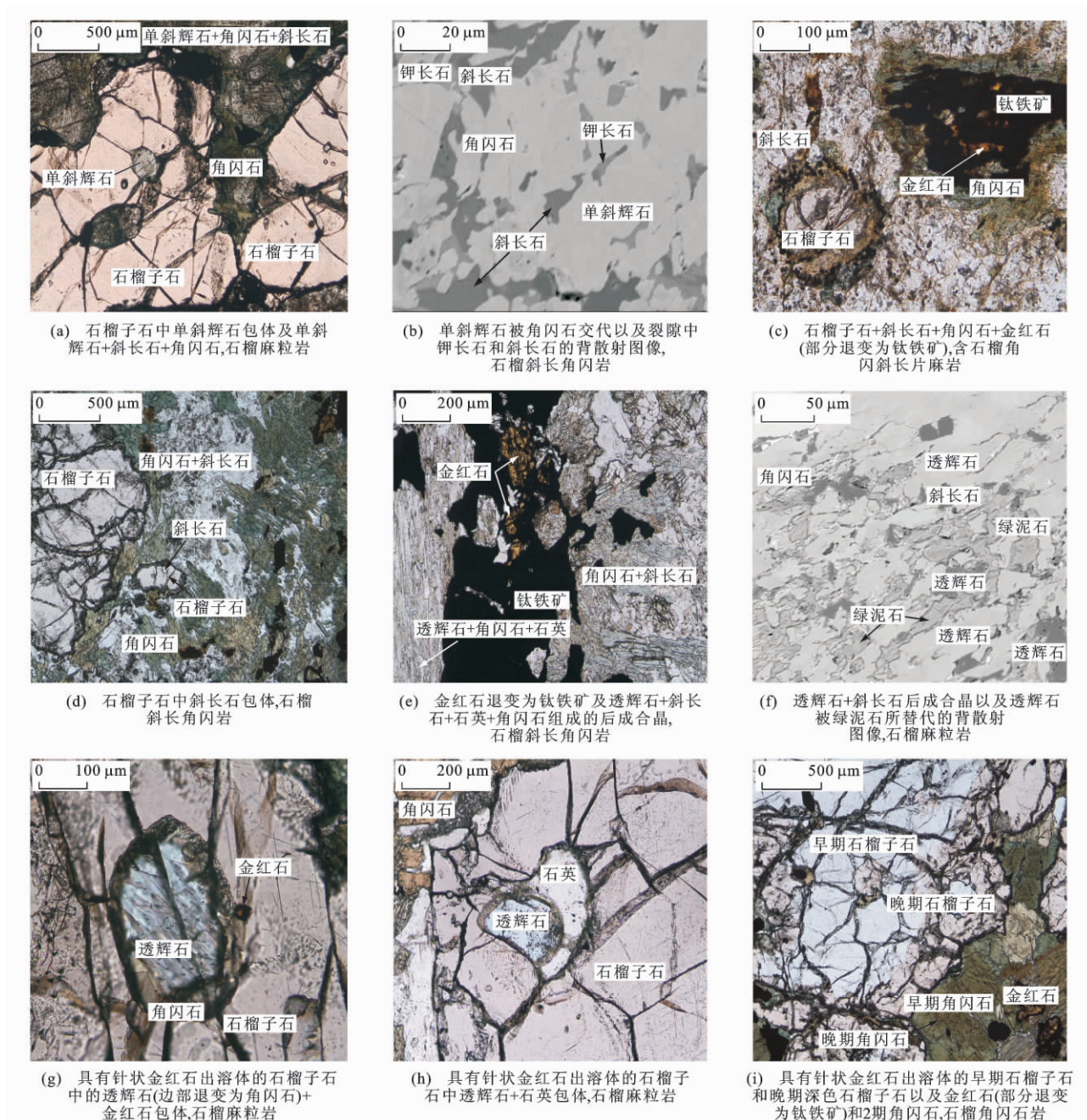


图4 华北克拉通下地壳包体的显微照片

Fig. 4 Photomicrographs of the Lower-crustal Xenoliths from the Southeastern Margin of North China Craton

对均一,为铁铝榴石-镁铝榴石-钙铝榴石固溶体。斜长石有3种产出形式:以包裹体形式产于石榴子石中;以后成合晶形式与单斜辉石和(或)角闪石共生;以基质形式产出。大部分金红石已退变为钛铁矿,单斜辉石被以角闪石+斜长石组成的后成合晶结构所替代[图4(d)、(e)]。有时可见裂隙中钾长石等矿物的分布[图4(b)],可能指示晚期的溶体交代作用结果。

石榴麻粒岩(如样品07JG14、08JG15)主要组成矿物为石榴子石、斜长石、角闪石、单斜辉石、石英、

金红石、榍石和少量绿泥石[图4(a)、(f)~(h)]。单斜辉石为透辉石,有2种产出形式:与金红石和石英共生,以包裹体的形式产出于石榴子石和榍石中;以残晶形式与斜长石和角闪石共生产于后成合晶中。透辉石局部被绿泥石所交代[图4(f)]。含有金红石和角闪石针状出溶体的单斜辉石有时含有角闪石退变边[图4(g)]。石榴子石的典型特征是含有定向的针状金红石出溶体[图4(g)],成分上类似于样品07JG12的石榴子石。长石主要以基质或后成合晶形式存在[图4(f)]。基质中的金红石部分

被钛铁矿所替代。

含石榴角闪斜长片麻岩(如样品 07JG32)[图 4(c)]主要矿物组合为石榴子石+斜长石+角闪石+金红石,金红石部分退变为钛铁矿,石榴子石被斜长石+角闪石后成合晶所环绕。此外,石榴角闪石岩的主要组成矿物为石榴子石、角闪石、金红石[图 4(i)];石榴子石有 2 期,包括具有针状金红石出溶体的早期石榴子石和晚期深色石榴子石;角闪石也有 2 期,分别为早期的褐色富铁、高钛角闪石和晚期的绿色低钛角闪石。

不同样品中的角闪石是按照 Leake 等的分类方案^[37]来命名的。棕褐色、富 TiO_2 角闪石为韭闪石和铁质韭闪石,而绿色、低 TiO_2 的角闪石为镁质-绿钠闪石和浅闪石[图 3(b)、(e),图 4(i)]。表明这 2 类角闪石分别形成于不同的变质条件下,如麻粒岩相和角闪岩相条件下,因为前人研究已证明角闪石中 Ti 含量随变质程度的增加而升高^[6,38]。这种差别也得到了岩相学证据的支持:绿角闪石产出于后成合晶中,而棕褐色角闪石以包裹体形式产出。有些样品中含有较多的富钛角闪石,可能反映了它们不同的原岩成分。根据电子探针成分分析,不同类型的角闪石可能形成于不同的变质条件下(图 5^[39]),这进一步证明本区下地壳岩石经历了多期变质叠加与改造过程。

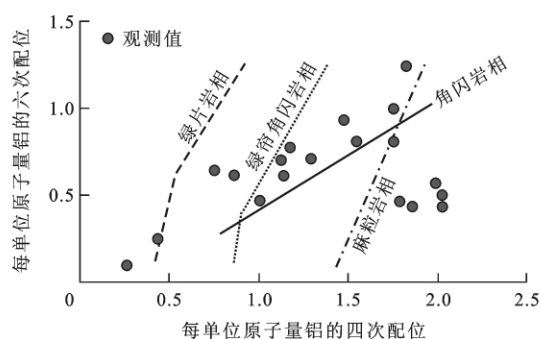


图 5 华北克拉通东南缘下地壳岩石中不同类型角闪石铝的六次配位-四次配位图解

Fig. 5 $\text{Al}^{\text{VI}}-\text{Al}^{\text{IV}}$ Diagram for Different Types of Amphiboles from the Precambrian Lower-crustal Rocks in the Southeastern Margin of North China Craton

综上所述,无论是变质基底还是下地壳包体岩石,它们大多数(除下地壳上部的岩石以外)都含有石榴子石、单斜辉石、金红石、斜长石和石英等峰期矿物组合,指示形成于高压(大约 1.1 GPa)麻粒岩相条件下^[40]。另外,这些样品缺少诸如蓝晶石和硅线石之类的富铝矿物相,表明其原岩为岩浆岩而非

沉积岩成因^[41]。基于上述显微结构观察和矿物之间的关系,至少可以区分出峰期高压麻粒岩相(石榴子石+斜长石+单斜辉石+石英+金红石±富钛角闪石)变质矿物组合,以及后期角闪岩相(斜长石+绿角闪石+钛铁矿+榍石)和绿片岩相(绿泥石+方解石+磁铁矿)等退变质矿物组合。因此,研究区前寒武纪变质基底岩石以及大多数下地壳包体岩石所经历的最高变质条件为高压麻粒岩相。矿物组合与初步的温压计算结果表明,高压麻粒岩相变质阶段温度和压力分别为 $800\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 860\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1.0 \sim 1.2\text{ GPa}$ ^[29]。但是,由于缓慢冷却,尤其是可能经历了缓慢折返作用的岩石(如样品 07FY01),而导致矿物的 Fe-Mg 交换或重置^[42],所计算的温度有可能代表高压麻粒岩相变质阶段的最小估计值^[43]。

3 幕式地壳生长与多期改造的年代学和 Hf 同位素证据

由于受到后期多阶段变质作用叠加的影响,Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素体系发生了重置和(或)矿物之间的同位素不平衡,往往难以准确测定不同变质阶段的年代,而锆石无疑是理想的定年矿物。锆石是一种难熔矿物,具有很低的 Pb 扩散速率^[44],因而高级变质岩中锆石常常能保留多期次的岩浆作用和变质作用记录^[45-49]。因此,锆石的原位 U-Pb 定年是获得经历过复杂演化过程和多期变质作用岩石可靠时代的有效方法。但是,由于物理化学条件变化和每期变质时间长短的不同,导致早期的锆石结构发生改变和(或)新的锆石生长,从而造成高级变质岩中的锆石结构显示较大的变化性和复杂性^[50]。锆石中的变质矿物包裹体能把年代学结果和变质作用直接联系起来,而对于那些反映岩石复杂的岩浆和变质作用历史的环带锆石所表现出的诸如不规则边界、不同的核-幔-边区域之类的复杂结构可以通过阴极发光(CL)图像揭示出来^[51-52]。此外,锆石的 Lu-Hf 同位素体系优于其 U-Pb 体系,通常能抵抗后期蚀变和改造作用的影响^[44,53-54],能保存近于初始的 Hf 同位素比值,并可以用来示踪岩石成因和源区研究^[55-56]。因此,单颗粒锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素的联合分析数据已被证明能提供有关岩浆和变质事件以及岩石成因和壳-幔演化的可靠详细信息^[53-55,57-65]。正如前文所述,华北克拉通是一个古老的克拉通并经历了复杂的演化过程,为此,笔者根据最新研究成果以及已发表的有关华北克拉通东南缘变质基底和下地壳包体的锆石 U-Pb 年代学和

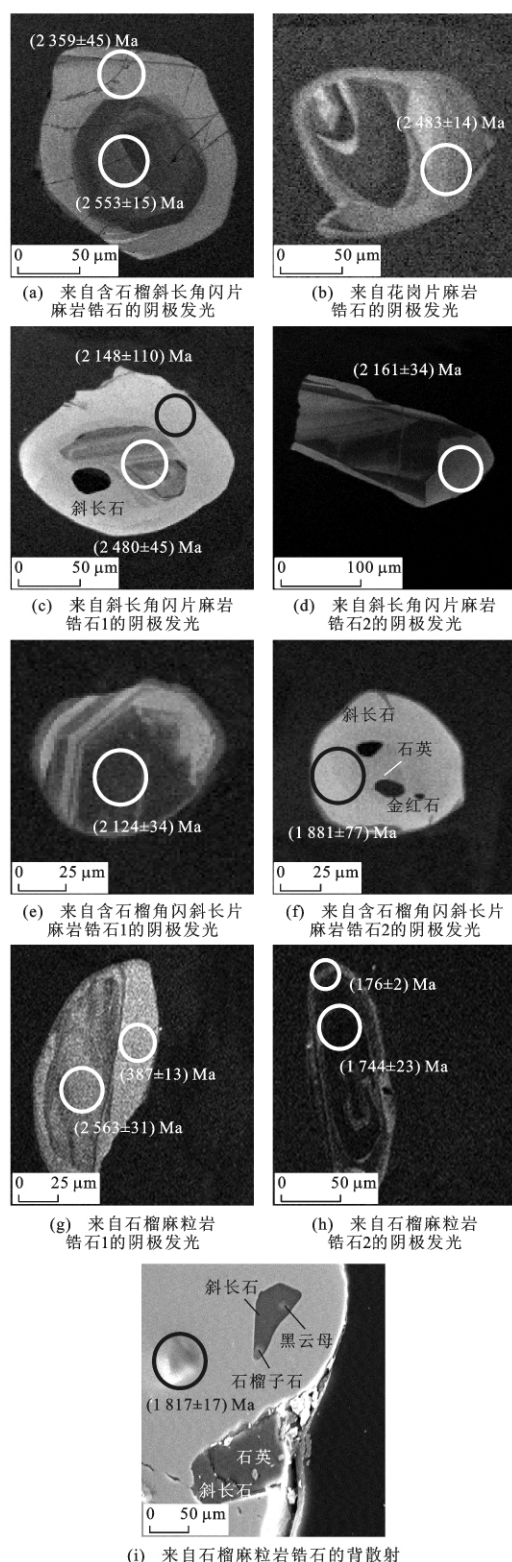


图6 华北克拉通东南缘不同类型下地壳包体岩石中代表性锆石的阴极发光和背散射图像
Fig. 6 Cathodoluminescence (CL) Images and Back Scattered Electron Image of Representative Zircons from Different Types of Lower-crustal Xenoliths in the Southeastern Margin of North China Craton

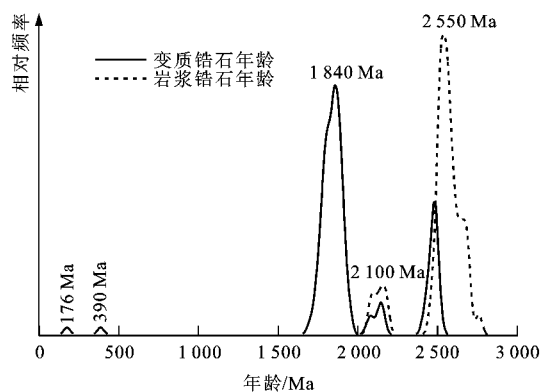
Lu-Hf 同位素数据,探讨了研究区前寒武纪下地壳的形成和演化过程。

根据锆石阴极发光图像(图6^[29,33-34])可以看出,研究区前寒武纪下地壳包体岩石经历了复杂的岩浆-热事件和多期变质作用,大多数锆石显示核-幔边结构,包括典型的岩浆锆石核和具有石榴子石+单斜辉石+金红石+斜长石等高压麻粒岩相矿物组合的1.8~1.9 Ga 变质锆石^[29,33]以及具有高的Ti 温度(大于800 °C)的2.48~2.49 Ga 麻粒岩相变质锆石^[34]。锆石 U-Pb 年龄结果统计(图7)显示,研究区经历了2.5~2.6、2.1 Ga 的岩浆-热事件以及2.5~2.6、2.1、1.8~1.9 Ga 以及390、176 Ma 的变质事件。其中,形成于2.5~2.6 Ga 的下地壳岩石包括2类:一类是经历了2.1 Ga 和(或)1.8~1.9 Ga 高压麻粒岩相变质作用以及390、176 Ma 的变质改造,而且可能是因为这类岩石位于下地壳下部,在2.1 Ga 时靠近俯冲带,因而遭受大洋俯冲与变质作用的强烈影响而造成 Pb 同位素均一化,形成了具有与约2.1 Ga 岛弧岩石一致的高放射成因 Pb 同位素组成;另一类岩石则形成于2.55~2.64 Ga,可能因处于下地壳上部而仅遭受了2.48~2.49 Ga 麻粒岩相变质作用,但没有2.1 Ga 和(或)1.8~1.9 Ga 变质叠加的岩石学和年代学记录,表现为典型的前寒武纪下地壳岩石特点的低放射成因 Pb 同位素组成^[34]。此外,强烈的约1.8 Ga 高压麻粒岩相变质作用可能是由于幔源岩浆底侵于下地壳底部而导致大规模地壳加热和增厚引起的,这也与该时期华北克拉通存在广泛的拉张、裂谷作用以及相关的镁铁质岩浆底侵等相吻合^[18,20-21,29]。

锆石的 Hf 同位素分析(图8^[33])指示,研究区前寒武纪下地壳经历了2.5 Ga 和2.1 Ga 的岩浆-热事件。鉴于这2期锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 中有一部分样品为明显的正值(如5~12),反映它们的原岩来自于新生地壳,结合其原岩性质和地球化学特点,指示它们的岩石成因与2期俯冲增生事件有关^[33]。此外,2.7~2.8 Ga 的继承锆石 U-Pb 年龄(图7)和锆石 Hf 模式年龄^[33-34]暗示研究区可能还存在更老的地壳物质或更早的地壳生长时期,这尚需进一步的研究。

4 结 语

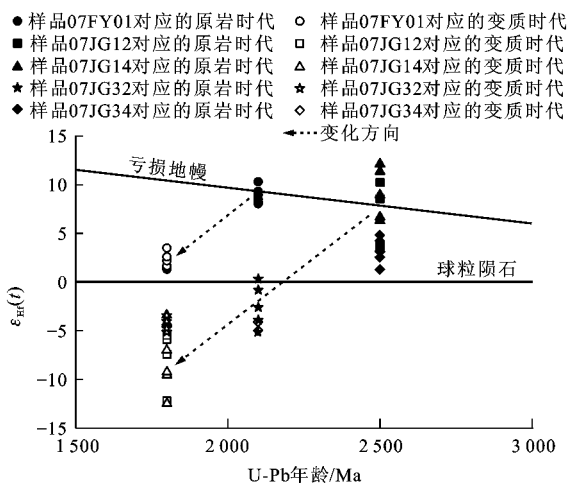
(1)华北克拉通东南缘前寒武纪下地壳的岩石组成复杂,反映一个不同形成时代和不同成因并经过多期不同程度变质作用与改造的形成、演化过程。



统计数据来自参考文献[26,28-29,32-34,66-67]

图7 华北克拉通东南缘前寒武纪下地壳岩石的锆石 U-Pb 年龄累计曲线

Fig. 7 Accumulative Curves of Zircon U-Pb Ages for the Precambrian Lower-crustal Rocks in the Southeastern Margin of North China Craton



$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为年龄 t 对应的 ϵ_{Hf} 值, 其中 $\epsilon_{\text{Hf}} = \{ [N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})]_i / [N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})]_{\text{CHUR}} - 1 \} \times 10^4$, $N(^{176}\text{Hf})$ 和 $N(^{177}\text{Hf})$ 分别为同位素 ^{176}Hf 和 ^{177}Hf 的原子数; 下标 i 表示初始比值, 下标 CHUR 表示球粒陨石

图8 华北克拉通东南缘前寒武纪下地壳岩石的锆石 U-Pb 年龄和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的关系

Fig. 8 Relationship Between U-Pb Ages and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ for the Igneous Core and Metamorphic Rim of Zircons as Identified by the SHRIMP U-Pb Dating for the Precambrian Lower-crustal Rocks from the Southeastern Margin of North China Craton

(2) 华北克拉通东南缘在前寒武纪发生过幕式地壳生长, 至少包括 2.5~2.6 Ga 和 2.1 Ga 这 2 期俯冲增生和约 1.8 Ga 的垂向增生过程。由 Hf 模式年龄和继承锆石限定的 2.7~2.8 Ga 可能代表另一期地壳生长时间。

(3) 华北克拉通东南缘前寒武纪下地壳岩石至少

经历过 2.5~2.6、2.1、1.8~1.9 Ga 以及 390、176 Ma 等多期构造-热事件和不同程度的变质交代与改造, 造成岩石中某些元素和同位素特征发生变异。

(4) 华北克拉通东南缘前寒武纪下地壳岩石显示 2 类 Pb 同位素组成: 一是具有典型前寒武纪下地壳岩石特点的低放射成因 Pb 同位素组成; 另一类是因为 2.1 Ga 大洋俯冲与变质作用的强烈影响而造成靠近俯冲带的下地壳岩石发生 Pb 同位素均一化并形成高放射成因 Pb 同位素组成。

本研究一直得到李曙光院士的指导和帮助, 锆石 U-Pb 定年分析得到北京离子探针中心刘敦一先生和宋彪先生等的指导和帮助, 锆石 Hf 同位素分析和矿物电子探针分析分别得到中国科学院地质与地球物理研究所杨进辉研究员和杨岳衡博士以及中国地质科学院矿产资源研究所陈振宇博士等的支持和帮助, 在此一并表示感谢!

参考文献:

References:

- [1] RUDNICK R L. Making Continental Crust[J]. Nature, 1995, 378: 571-578.
- [2] WEBER M B I, TARNEY J, KEMPTON P D, et al. Crustal Make-up of the Northern Andes: Evidence Based on Deep Crustal Xenolith Suites, Mercaderes, SW Colombia[J]. Tectonophysics, 2002, 345 (1/2/3/4): 49-82.
- [3] KEMPTON P D, DOWNES H, EMBEY-ISZTIN A. Mafic Granulite Xenoliths in Neogene Alkali Basalts from the Western Pannonian Basin: Insight into the Lower Crust of a Collapsed Orogen[J]. Journal of Petrology, 1997, 38(7): 941-970.
- [4] YARDLEY B W D. An Introduction to Metamorphic Petrology[M]. London: Longman Scientific and Technical, 1989.
- [5] O'BRIEN P J, RÖTZLER J. High-pressure Granulites: Formation, Recovery of Peak Conditions, and Implications for Tectonics[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2003, 21(1): 3-20.
- [6] PATTISON D R M. Petrogenetic Significance of Orthopyroxene-free Garnet + Clinopyroxene + Plagioclase ± Quartz-bearing Metabasites with Respect to the Amphibolite and Granulite Facies[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2003, 21(1): 21-34.
- [7] INDARES A D. Metamorphic Textures and P-T Evolution of High-P Granulites from the Lelukuau Terrane, NE Grenville Province[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2003, 21(1): 35-48.

- [8] ZHAO G, WILDE S A, CAWOOD P A, et al. Archean Blocks and Their Boundaries in the North China Craton: Lithological, Geochemical, Structural, and *P-T* Path Constraints and Tectonic Evolution[J]. *Precambrian Research*, 2001, 107(1/2): 45-73.
- [9] CARSWELL D A, O'BRIEN P J. Thermobarometry and Geotectonic Significance of High-pressure Granulites: Examples from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif in Lower Austria[J]. *Journal of Petrology*, 1993, 34(3): 427-459.
- [10] ZHAO G C, CAWOOD P A, WILDE S A, et al. Metamorphism of Basement Rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implications for Palaeoproterozoic Tectonic Evolution[J]. *Precambrian Research*, 2000, 103(1/2): 55-88.
- [11] ZHAO G C, WILDE S A, CAWOOD P A, et al. Archean Blocks and Their Boundaries in the North China Craton: Lithological, Geochemical, Structural, and *P-T* Path Constraints and Tectonic Evolution[J]. *Precambrian Research*, 2001, 107(1/2): 45-73.
- [12] GUO J H, O'BRIEN P J, ZHAI M G. High-pressure Granulites in the Sanggan Area, North China Craton: Metamorphic Evolution, *P-T* Paths and Geotectonic Significance[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2002, 20(8): 741-756.
- [13] GUO J H, SUN M, CHEN F K, et al. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of High-pressure Granulites in the Sanggan Area, North China Craton: Timing of Paleoproterozoic Continental Collision[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24(5): 629-642.
- [14] WILDE S A, ZHAO G C, SUN M. Development of the North China Craton During the Late Archean and Its Final Amalgamation at 1.8 Ga: Some Speculations on Its Position Within a Global Palaeoproterozoic Supercontinent[J]. *Gondwana Research*, 2002, 5(1): 85-94.
- [15] KRÖNER A, WILDE S A, LI J H, et al. Age and Evolution of a Late Archean to Paleoproterozoic Upper to Lower Crustal Section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping Terrain of Northern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24(5): 577-595.
- [16] WILDE S A, ZHAO G C. Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24(5): 519-522.
- [17] HOU G T, LIU Y L, LI J H. Evidence for ~1.8 Ga Extension of the Eastern Block of the North China Craton from SHRIMP U-Pb Dating of Mafic Dyke Swarms in Shandong Province[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 27(4): 392-401.
- [18] ZHAI M G, BIAN A G, ZHAO T P. The Amalgamation of the Supercontinent of North China Craton at the End of the Neo-archaeon, and Its Breakup During the Late Palaeoproterozoic and Meso-proterozoic[J]. *Science in China: Series D*, 2000, 43(S): 219-232.
- [19] ZHAI M G, LIU W J. Palaeoproterozoic Tectonic History of the North China Craton: A Review[J]. *Precambrian Research*, 2003, 122(1/2/3/4): 183-199.
- [20] PENG P, ZHAI M G, ZHANG H F, et al. Geochronological Constraints on the Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: SHRIMP Zircon Ages of Different Types of Mafic Dikes[J]. *International Geology Review*, 2005, 47(5): 492-508.
- [21] HOU G T, LI J H, YANG M H, et al. Geochemical Constraints on the Tectonic Environment of the Late Palaeoproterozoic Mafic Dyke Swarms in the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 2008, 13(1): 103-116.
- [22] LU S N, ZHAO G C, WANG H C, et al. Precambrian Metamorphic Basement and Sedimentary Cover of the North China Craton: A Review[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160(1/2): 77-93.
- [23] ZHAI M G, GUO J H, YAN Y H, et al. Discovery of High-pressure Basic Granulite Terrain in North China Archean Craton and Preliminary Study[J]. *Science in China: Series B*, 1993, 36(11): 1402-1408.
- [24] ZHENG J P, SUN M, LU F X, et al. Mesozoic Lower Crustal Xenoliths and Their Significance in Lithospheric Evolution Beneath the Sino-Korean Craton[J]. *Tectonophysics*, 2003, 361(1/2): 37-60.
- [25] XU W L, WANG D Y, LIU X C, et al. Discovery of Eclogite Inclusions and Its Geological Significance in Early Jurassic Intrusive Complex in Xuzhou-northern Anhui, Eastern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(14): 1212-1216.
- [26] XU W L, GAO S, WANG Q H, et al. Mesozoic Crustal Thickening of the Eastern North China Craton: Evidence from Eclogite Xenoliths and Petrologic Implications[J]. *Geology*, 2006, 34(9): 721-724.
- [27] XU W L, GAO S, YANG D B, et al. Geochemistry of Eclogite Xenoliths in Mesozoic Adakitic Rocks from Xuzhou-Suzhou Area in Central China and Their Tectonic Implications[J]. *Lithos*, 2009, 107(3/4): 269-280.
- [28] GUO S S, LI S G. SHRIMP Zircon U-Pb Ages for the Palaeoproterozoic Metamorphic-magmatic Events in

- the Southeast Margin of the North China Craton[J]. Science in China; Series D, 2009, 52(8): 1039-1045.
- [29] LIU Y C, WANG A D, ROLFO F, et al. Geochronological and Petrological Constraints on Palaeoproterozoic Granulite Facies Metamorphism in Southeastern Margin of the North China Craton [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2009, 27(2): 125-138.
- [30] LIU D Y, NUTMAN A P, COMPSTON W, et al. Remnants of $\geq 3\ 800$ Ma Crust in Chinese Part of the Sino-Korean Craton[J]. Geology, 1992, 20(4): 339-342.
- [31] KUSKY T M, LI J H. Paleoproterozoic Tectonic Evolution of the North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2003, 22(4): 383-397.
- [32] WANG A D, LIU Y C, SANTOSH M, et al. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Pb Isotopes from the Metamorphic Basement in the Wuhe Complex; Implications for Neoproterozoic Active Continental Margin Along the Southeastern North China Craton and Constraints on the Petrogenesis of Mesozoic Granitoids[J]. Geoscience Frontiers, 2012, doi: 10.1016/j. qsf. 2012. 05. 001.
- [33] LIU Y C, WANG A D, LI S G, et al. Composition and Geochronology of the Deep-seated Xenoliths from the Southeastern Margin of the North China Craton[J]. Gondwana Research, 2012, doi: 10.1016/j. gr. 2012. 06. 009.
- [34] WANG A D, LIU Y C, GU X F, et al. Late-Neoproterozoic Magmatism and Metamorphism at the Southeastern Margin of the North China Craton and Their Tectonic Implications[J]. Precambrian Research, 2012, 220/221: 65-79.
- [35] 王安东, 刘贻灿, 古晓锋, 等. 蚌埠老山含石榴子石片麻状花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其对华南俯冲陆壳再循环的意义[J]. 矿物岩石, 2009, 29(2): 38-43.
- WANG An-dong, LIU Yi-can, GU Xiao-feng, et al. Zircon SHRIMP U-Pb Dating for Garnet-bearing Gneissic Granite at Laoshan, Bengbu; Implications for Recycling of the Subducted Continental Crust of the South China Block[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2009, 29(2): 38-43.
- [36] YANG D B, XU W L, WANG Q H, et al. Chronology and Geochemistry of Mesozoic Granitoids in the Bengbu Area, Central China; Constraints on the Tectonic Evolution of the Eastern North China Craton [J]. Lithos, 2010, 114(1/2): 200-216.
- [37] LEAKE B E, WOOLLEY A R, ARPS C E S, et al. Nomenclature of Amphiboles; Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names[J]. American Mineralogist, 1997, 82(9/10): 1019-1037.
- [38] RAASE P. Al and Ti Contents of Hornblende, Indicators of Pressure and Temperature of Regional Metamorphism[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1974, 45(3): 231-236.
- [39] GROppo C, LOMBARDO B, ROLFO F, et al. Clockwise Exhumation Path of Granulitized Eclogites from the Ama Drime Range (Eastern Himalayas) [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2007, 25(1): 51-75.
- [40] ROGERS N W. Granulite Xenoliths from Lesotho Kimberlites and the Lower Continental Crust[J]. Nature, 1977, 270: 681-684.
- [41] DESSAI A G, MARKWICK A, VASELLI O, et al. Granulite and Pyroxenite Xenoliths from the Deccan Trap; Insight into the Nature and Composition of the Lower Lithosphere Beneath Cratonic India[J]. Lithos, 2004, 78(3): 263-290.
- [42] FROST B R, CHACKO T. The Granulite Uncertainty Principle; Limitations on Thermobarometry in Granulites[J]. The Journal of Geology, 1989, 97(4): 435-450.
- [43] DAVIS W J, CANIL D, MACKENZIE J M, et al. Petrology and U-Pb Geochronology of Lower Crustal Xenoliths and the Development of a Craton, Slave Province, Canada[J]. Lithos, 2003, 71(2): 541-573.
- [44] CHERNIAK D J, WATSON E B. Diffusion in Zircon [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 113-143.
- [45] RUBATTO D, WILLIAMS I S, BUICK I S. Zircon and Monazite Response to Prograde Metamorphism in the Reynolds Range, Central Australia[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2001, 140(4): 458-468.
- [46] AYERS J C, DUNKLE S, GAO S, et al. Constraints on Timing of Peak and Retrograde Metamorphism in the Dabie Shan Ultrahigh-pressure Metamorphic Belt, East-central China, Using U-Th-Pb Dating of Zircon and Monazite [J]. Chemical Geology, 2002, 186(3/4): 315-331.
- [47] MÖLLER A, O'BRIEN P J, KENNEDY A, et al. Polypase Zircon in Ultrahigh-temperature Granulites (Rogaland, SW Norway): Constraints for Pb Diffusion in Zircon[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2002, 20(8): 727-740.

- [48] LIU Y C, LI S G, GU X F, et al. Ultrahigh-pressure Eclogite Transformed from Mafic Granulite in the Dabie Orogen, East-central China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2007, 25(9): 975-989.
- [49] LIU Y C, GU X F, LI S G, et al. Multistage Metamorphic Events in Granulitized Eclogites from the North Dabie Complex Zone, Central China: Evidence from Zircon U-Pb Age, Trace Element and Mineral Inclusion[J]. *Lithos*, 2011, 122(1/2): 107-121.
- [50] CORFU F, HANCHAR J M, HOSKIN P W O, et al. Atlas of Zircon Textures[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 469-500.
- [51] GEBAUER D, SCHERTL H P, BRIX M, et al. 35 Ma Old Ultrahigh-pressure Metamorphism and Evidence for Very Rapid Exhumation in the Dora Maira Massif, Western Alps[J]. *Lithos*, 1997, 41(1/2/3): 5-24.
- [52] HERMANN J, RUBATTO D, KORASKOV A, et al. Multiple Zircon Growth During Fast Exhumation of Diamondiferous, Deeply Subducted Continental Crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan) [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2001, 141(1): 66-82.
- [53] AMELIN Y, LEE D C, HALLIDAY A N. Early-middle Archaean Crustal Evolution Deduced from Lu-Hf and U-Pb Isotopic Studies of Single Zircon Grains[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(24): 4205-4225.
- [54] GERDES A, ZEH A. Zircon Formation Versus Zircon Alteration—New Insights from Combined U-Pb and Lu-Hf In-situ LA-ICP-MS Analyses, and Consequences for the Interpretation of Archean Zircon from the Central Zone of the Limpopo Belt[J]. *Chemical Geology*, 2009, 261(3/4): 230-243.
- [55] GRIFFIN W L, BELOUSOVA E A, SHEE S R, et al. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope Evidence from Detrital Zircons[J]. *Precambrian Research*, 2004, 131(3/4): 231-282.
- [56] WOODHEAD J, HERGT J, SHELLEY M, et al. Zircon Hf-isotope Analysis with an Excimer Laser, Depth Profiling, Ablation of Complex Geometries, and Concomitant Age Estimation[J]. *Chemical Geology*, 2004, 209(1/2): 121-135.
- [57] VERVOORT J D, BLICHERT-TOFT J. Evolution of the Depleted Mantle: Hf Isotope Evidence from Juvenile Rocks Through Time[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(3/4): 533-556.
- [58] GRIFFIN W L, PEARSON N J, BELOUSOVA E, et al. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-MC-ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(1): 133-147.
- [59] ANDERSEN T, GRIFFIN W L, PEARSON N J. Crustal Evolution in the SW Part of the Baltic Shield: the Hf Isotope Evidence [J]. *Journal of Petrology*, 2002, 43(9): 1725-1747.
- [60] CONDIE K C, BEYER E, BELOUSOVA E, et al. U-Pb Isotopic Ages and Hf Isotopic Composition of Single Zircons: The Search for Juvenile Precambrian Continental Crust [J]. *Precambrian Research*, 2005, 139(1/2): 42-100.
- [61] IIZUKA T, HIRATA T, KOMIYA T, et al. U-Pb and Lu-Hf Isotope Systematics of Zircons from the Mississippi River Sand: Implications for Reworking and Growth of Continental Crust [J]. *Geology*, 2005, 33(6): 485-488.
- [62] HAWKESWORTH C J, KEMP A I S. Using Hafnium and Oxygen Isotopes in Zircons to Unravel the Record of Crustal Evolution[J]. *Chemical Geology*, 2006, 226(3/4): 144-162.
- [63] WU F Y, YANG Y H, XIE L W, et al. Hf Isotopic Compositions of the Standard Zircons and Baddeleyites Used in U-Pb Geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2006, 234(1/2): 105-126.
- [64] KEMP A I S, FOSTER G L, SCHERSTEN A, et al. Concurrent Pb-Hf Isotope Analysis of Zircon by Laser Ablation Multi-collector ICP-MS, with Implications for the Crustal Evolution of Greenland and the Himalayas[J]. *Chemical Geology*, 2009, 261(3/4): 244-260.
- [65] ZEH A, GERDES A, BARTON J M, et al. Archean Accretion and Crustal Evolution of the Kalahari Craton—The Zircon Age and Hf Isotope Record of Granitic Rocks from Barberton/Swaziland to the Franciscan Arc[J]. *Journal of Petrology*, 2009, 50(5): 933-966.
- [66] HUANG X L, XU Y G, LIU D Y. Geochronology, Petrology and Geochemistry of the Granulite Xenoliths from Nushan, East China: Implication for a Heterogeneous Lower Crust Beneath the Sino-Korean Craton [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(1): 127-149.
- [67] ZHENG J P, GRIFFIN W L, MA Q, et al. Accretion and Reworking Beneath the North China Craton[J]. *Lithos*, 2012, 149(1): 61-78.