中国科学: 地球科学 2025 年 第 55 卷 第 6 期: 1913 ~ 1928
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

太古代-元古代地壳增生机制转换的地震学特征: 以西澳大利亚克拉通Capricorn造山带为例

栗婷姿[1,2], 赵亮[1,3*], 杨建锋[1,3], 徐小兵[4], 王坤[5], 万博[1], Ruth MURDIE[6], Klaus GESSNER[6], Simon JOHNSON[6], 袁怀玉[2,6,7*]

1. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029
2. Centre for Exploration Targeting, University of Western Australia, Crawley 6009, Australia
3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049
4. 清华大学数学科学系, 北京 100084
5. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081
6. Geological Survey of Western Australia, East Perth 6004, Australia
7. School of Natural Sciences, Macquarie University, North Ryde 2109, Australia
* 通讯作者, E-mail: zhaoliang@mail.iggcas.ac.cn(赵亮), huaiyu.yuan@uwa.edu.au(袁怀玉)

收稿日期: 2024-07-17; 收修改稿日期: 2025-02-08; 接受日期: 2025-03-24; 网络版发表日期: 2025-05-09
国家自然科学基金项目(42304063、91955210)和中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项项目(DQJB22R33)资助

摘要 太古代至元古代的过渡期是地球构造历史上一个关键时期, 主要的地壳形成机制在此期间可能从垂直增生的地幔柱构造转换为水平增生的现代板块构造. 从地震学角度推断, 这一体制变化可能在稳定区域的地壳中留下印记. 然而, 由于时空采样的稀疏性, 是否可以从地震观测中推断出地壳特征的长期演化尚无全球共识. 文章利用在西澳大利亚克拉通Capricorn造山带中布设的密集地震台网, 通过分析远震接收函数, 刻画了该区域太古代至元古代跨度接近二十亿年克拉通地壳的波速比和界面特征, 并与该区地球化学手段揭示的地壳年龄进行了相关性分析. 结果表明, 在中太古代-古元古代期间, Capricorn造山带的地壳厚度逐渐增加, 波速比变化表明岩石成分从长英质演变为较中性的成分, 莫霍面信号由剧烈起伏趋于平缓. 在主要块体边界处可观察到显著的地壳增厚和偏基性的地壳成分, 且伴随着弱的莫霍面起伏和倾斜的莫霍面, 在空间上与22亿年前的Ophthalmia造山运动和20亿年前的Glenburgh造山运动一致. 我们推测研究区域的地壳特征变化最初产生于两期次的碰撞造山事件中, 并在碰撞后的热事件和变形过程中得到进一步改造. 这些特征与许多前寒武纪俯冲带的地震学观测结果相似. 因此, 我们推断在约22亿至20亿年, 主要的地壳形成机制已经转变为水平增生的现代板块运动. 本研究揭示了新太古代至古元古代俯冲的几何特征, 为深入认识太古代-元古代地壳增生以及地球动力学机制转换提供了新的深部约束.

关键词 太古代-元古代板块构造, 地壳增生, 西澳大利亚克拉通, Capricorn造山带, 接收函数, 地壳地震学特征

中文引用格式: 栗婷姿, 赵亮, 杨建锋, 徐小兵, 王坤, 万博, Murdie R, Gessner K, Johnson S, 袁怀玉. 2025. 太古代-元古代地壳增生机制转换的地震学特征: 以西澳大利亚克拉通Capricorn造山带为例. 中国科学: 地球科学, 55(6): 1913–1928, doi: 10.1360/SSTe-2024-0202
英文引用格式: Li T, Zhao L, Yang J, Xu X, Wang K, Wan B, Murdie R, Gessner K, Johnson S, Yuan H. 2025. Insights into changes in crust formation mechanisms across the Archean-Proterozoic Transition: Receiver function observations in the Capricorn Orogen, Western Australia. Science China Earth Sciences, 68(6): 1863–1877, https://doi.org/10.1007/s11430-024-1552-7

© 2025 《中国科学》杂志社

1 引言

早期大陆地壳成分主要是高于现今温度和压力条件的橄榄岩地幔部分熔融形成的铁镁质玄武岩(例如, Zegers和van Keken, 2001; Hawkesworth等, 2013; Bédard, 2018), 尽管这些冥古宙的地壳可能已经被破坏(例如, Harrison, 2009; Hawkesworth等, 2017). 现今保存下来的最古老大陆岩石主要形成于太古代时期, 表现为镁铁质和长英质混合的双峰特征(例如, Hawkesworth等, 2013; O'Neil和Carlson, 2017), 这与现代大陆地壳普遍认为更偏向长英质的特征形成鲜明对比(Rudnick和Gao, 2003). 因此得出大陆地壳从镁铁质向长英质转变的结论, 同时揭示了地壳形成机制从垂直增生的地幔柱构造转换为水平增生的现代板块构造的重大转折, 转折时间可能发生在30亿年至20亿年前(例如, Lee等, 2016; Tang等, 2016; Chowdhury等, 2017; Hawkesworth等, 2017; Wan等, 2020; 翟明国等, 2020).

早期的一些全球和区域尺度的地震观测证据支持在古老克拉通和稳定陆块中存在厚的镁铁质地壳(例如, Zandt和Ammon, 1995; Chevrot和van der Hilst, 2000; Pasyanos和Nyblade, 2007; Borah等, 2014; Ben Mansour等, 2018), 但全球大陆地壳综合研究表明, 未受破坏的太古代地区可能具有薄的长英质地壳(例如, Durrheim和Mooney, 1991; Rudnick和Gao, 2003; Keller和Schoene, 2012; Abbott等, 2013; Baranov和Bobrov, 2018), 而晚太古代地壳通常具有厚的、更镁铁质的特征(Abbott等, 2013). 然而, 最近的一些太古代地壳研究中, 加入了地壳形成年龄的统计信息, 研究发现了一些与时间变化相关的地壳特征, 即地壳的厚度在早太古代至晚太古代期间随时间推移逐渐增厚; 同期, 地壳的岩性由酸性转变为中性(例如, Thompson等, 2010; Abbott等, 2013; Gilligan等, 2016; Levin等, 2016; Petrescu等, 2016). 这种太古代地壳演化趋势可能受控于古老的玄武质地壳的重熔与分异作用(例如, Zegers和van Keken, 2001; Bédard, 2006), 以及在更高潜温条件下铁镁质地壳的拆沉作用(Johnson等, 2014; Levin等, 2016), 是早期地壳形成垂直增生机制的重要判定标志(Bédard, 2006; Yuan, 2015).

然而, 这种随时间演化的特征是否在克拉通地区具有普适性, 目前尚有争论. 非洲、亚马逊、西伯利亚和格陵兰克拉通的研究显示, 地壳特性存在很大差异, 并且地壳厚度和成分的演化没有明显的关联性(例如, Assumpção等, 2013; Thybo和Artemieva, 2013; Tugume等, 2013; Kachingwe等, 2015; Darbyshire等, 2018). 相反, 在印度和南美洲的克拉通甚至存在负相关性(即地壳变薄, 成分从镁铁质演化为长英质, Lloyd等, 2010; Haldar等, 2018). 因此, 针对这些观测的差异, 亟待解决的科学问题包括: (1) 厚的镁铁质地壳是否代表了自初始形成以来长期保存的原始地壳? (2) 在克拉通化及其后续的改造过程中, 地幔物质和作用是否影响地壳特征改变(例如, 朱日祥等, 2012; 吴福元等, 2014)? 目前直接的地壳样品和地震数据覆盖是零散和不完整的(例如, O'Reilly和Griffin, 2013; Yuan, 2015; Condie, 2015; Hawkesworth等, 2017). 因此, 亟需获取更多可靠的观测填补现有证据的空白.

不同于垂直增生, 水平地壳增生一个重要标志是板块构造的俯冲作用(郑永飞和陈伊翔, 2019; 郑永飞等, 2022), 其会在地壳中留下独特的地震特征(例如, Snyder和Goleby, 2016). 在地震学成像上可以通过连续倾斜的莫霍面和上覆板片下方的倾斜高速异常来判定现代俯冲板片的特征(例如, Zhao等, 1992; Park等, 2004; Schulte-Pelkum等, 2005; Audet等, 2009; Nábělek等, 2009; Bostock, 2013; Zhao等, 2015, 2022; Wan等, 2020). 然而, 在前寒武纪碰撞带地壳下方可观测到增厚的地壳、高速的下地壳和升高的V_P/V_S比值(例如, Eaton和Cassidy, 1996; Snelson等, 1998; Yuan和Dueker, 2005; Zurek和Dueker, 2005; Hansen和Dueker, 2009; Yuan等, 2010; Thybo和Artemieva, 2013; Yuan和Bodin, 2018). 此外, 在太古代-元古代碰撞带中通常还可观测到倾斜的莫霍面和上地幔反射信号(例如, Bostock, 1997; Gorman等, 2002; van der Velden和Cook, 2005; Hansen和Dueker, 2009; Clowes等, 2010; Reading等, 2012; Kennett和Saygin, 2015; Darbyshire等, 2017; Calvert等, 2021; Zhao等, 2022). 与现代正在进行的俯冲带不同, 这些早期的地震特征被解释为残留的俯冲板片(例如, Calvert等, 1995, 2021; Eaton和Cassidy, 1996; Yuan和Dueker, 2005; Chen等, 2009; Yuan和Dueker, 2010). 统计研究揭示, 莫霍面和上地幔反射体的倾斜角度以及长度可能与俯冲带年龄有关(Zhao等, 2022). 这种倾斜莫霍面和上地幔反射体地震特征为判断和研究早期俯冲过程提供了重要依据.

本文的研究区域位于西澳大利亚Capricorn造山

带，覆盖西澳克拉通的中部(图1)，具有最早44亿年的地壳样品(Wilde等，2001)以及超过20亿年的早期地壳形成和演化构造历史. 研究表明，该地区记录了两次独特的古元古代俯冲运动，分别对应于22亿年前的Ophthalmia造山运动和20亿年前的Glenburgh造山运动(Johnson等，2011). 同位素和地球化学研究(Sheppard等，2004; Johnson等，2011; Lowrey等，2019; Wyman，2019)显示的岛弧岩浆活动是判定两期造山运动发生了俯冲过程的重要判据. 这两次早期俯冲事件的时间在全球前寒武纪俯冲事件中可能具有普遍性(Wan等，2020; Zhao等，2022). 此外，研究区域覆盖了古太古代到中太古代Pilbara以及Yilgarn克拉通. 因此，它为研究早期地壳垂直和水平增生两大机制提供了一个理想的场所. 由于有限的数据覆盖原因，该区域目前尚缺乏系统的深部地震研究. 本研究利用覆盖Capricorn造山带最新地震观测，研究了地壳厚度，V_P/V_S比值，以及使用单台和多台接收函数叠加技术测量的莫霍面起伏及锐度，获得了该区域新的地震观测结果. 结果表明，该区域的地壳演化与形成年龄具有相关性. 此外，本文发现了一些独特的地壳特征和前寒武俯冲现象，可将其归因于由古俯冲产生的新地壳物质以及随后的古元古代造山与俯冲作用复杂的相互作用.

2　区域构造背景

本文的研究区域空间上覆盖了Capricorn造山带及其与周围太古代Pilbara和Yilgarn克拉通的边界(图1). 该造山带是西澳克拉通(West Australian Craton, WAC)元古代拼合的重要组成部分(例如，Cawood和Korsch，2008; Johnson等，2011)，通过22亿年前的Ophthalmia造山运动及20亿年前的Glenburgh造山运动将西澳克拉通的各个部分拼合在一起. 值得注意的是，地球最早的地壳样品是来自该区域Yilgarn克拉通北部Narryer地块的44亿年的碎屑锆石(例如，Wilde等，2001). 该区域的地壳年龄分布从大于35亿年(Pilbara克拉通)到25亿年(Capricorn造山带核心区域Gascoyne省)(Champion，2013; Gardiner等，2017; Witt等，2020). 在西澳克拉通拼合之后，Capricorn造山带经历了超过十亿年的元古代改造事件(Johnson等，2013，2017; Korhonen和Johnson，2015). 因此，Capricorn造山带提供了一个具有超过20亿年早期地壳形成和演化历史的前寒武纪地壳.

几十年来，研究学者在研究区域开展了大量的地表地质观测和地球化学采样分析(例如，Cawood和Tyler，2004; Occhipinti等，2004，2017; Sheppard等，2004，2005，2016; Johnson等，2011，2013，2017). Johnson等(2013)详细描述了该区域地壳结构和构造演化历史. 在研究区域的北部，Pilbara克拉通拥有保存最完好的古太古代代到中太古代代地壳之一(例如，Van Kranendonk等，2007). 在该区域发育的一系列盆地中，Fortescue盆地记录了晚太古代Pilbara克拉通的裂解，Hamersley盆地标志着太古代-元古代过渡时期从被动边缘到主动边缘的转变. 在22亿年前的Ophthalmia造山作用期间，太古代的外来地块Gascoyne省与Pilbara克拉通沿着一条西北走向的缝合带碰撞(Johnson等，2011)，形成了与这一古俯冲作用相关的前陆盆地Ashburton盆地. 然而，这些构造单元之间确切的基底边界尚不清楚. 在20亿年前的Glenburgh造山作用中，拼接后的Pilbara和Gascoyne地体最终与其南侧的Yilgarn克拉通碰撞，形成了西澳克拉通(WAC). 在Capricorn造山带的中部和东部，Edmund和Collier盆地是在一系列中元古代及新元古代陆内再造和造山事件中形成的(Martin和Thorne，2004; Johnson等，2013). 研究区域的南部主要包括Yilgarn克拉通北缘的子地块(包括Narryer地块)和盆地.

Capricorn造山带的地壳结构在许多全澳洲大陆尺度(Clitheroe等，2000; Saygin和Kennett，2010，2012; Salmon等，2013; Kennett和Saygin，2015)和区域尺度(Reading等，2007，2012; Dentith等，2018; Yuan和Bodin，2018)的地球物理研究中得到了广泛的探测. Dentith等(2018)详细地描述了该地区的地球物理研究成果. 与相邻的太古代Pilbara和Yilgarn克拉通相比，Capricorn造山带的特征是地壳厚度增加，Moho振幅较弱且界面倾斜；一些台站下方的成像结果显示双Moho特征(Reading等，2007，2012). 在全球克拉通地壳汇编中(Abbott等，2013)，Capricorn造山带显示出典型的古元古代地震特征，即增厚的地壳和速度缓慢增加的Moho界面，支持通过太古代-元古代时期的地壳形成和克拉通稳定化过程代的长期变化. 在造山带的西部，主动源反射研究表明该区域具有复杂的壳内图像，具有许多大规模的倾斜反射体，被解释为地壳尺度的断层(Johnson等，2013; Kennett和Saygin，2015)，反映了该地区复

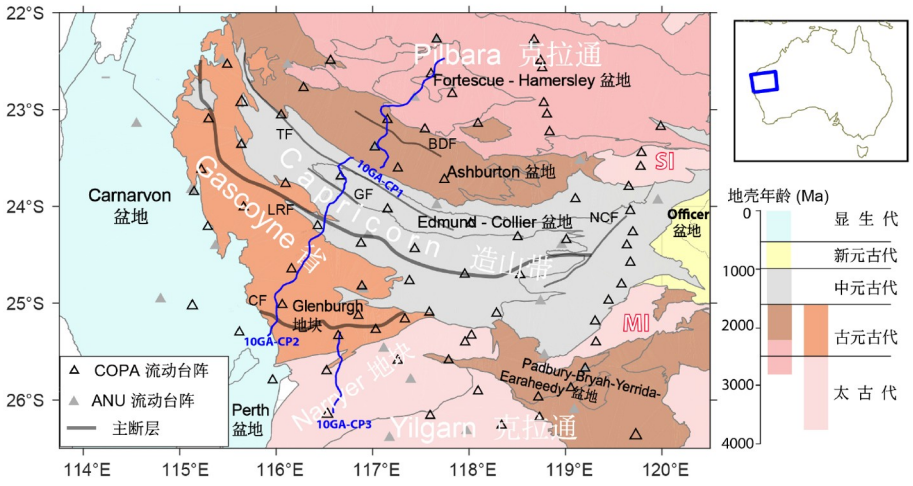


图 1　西澳区域构造和台站分布示意图

修改自Johnson等(2013). 右侧蓝色方块表示本文的研究区域. 不同颜色代表地块的年龄. 黑色三角形为COPA台站, 灰色三角形为澳洲国立大学流动台站以及区域台网固定台站, 蓝色线条表示主动源反射剖面10GA-CP3. 区域断层缩写分别为: BDF, Baring Downs Fault; TF, Talga Fault; GF, Godfrey Fault; LRF, Lyons River Fault system; CF, Cardilya Fault; NCF, Neds Creek Fault. 内围地块: SI, Sylvania Inlier; MI, Marymia Inlier

杂的地质构造历史.

3　COPA地震台阵

Capricorn造山带被动源地震台阵(Capricorn Orogen Passive-source Array, COPA; Aitken等, 2015; Gessner等, 2015)共布设76个宽频带台站, 覆盖了500km×1000km的区域(图1). 为了保证观测精度, COPA台阵的平均台间距约为40~50km, 并采用分阶段布设的策略. 最初地震仪被布设在Capricorn造山带西部, 观测时长约为1.5年; 并于第二年的下半年开始逐渐转移到造山带东部开始下一期2年的观测. 因此, 台阵平均记录时长均超过一年. 为扩展观测范围, 本研究还使用了澳大利亚地球科学院布设的固定台站(IRIS网络代码AU和S1)以及过去二十年布设的流动台阵(Reading和Kennett, 2003; Reading等, 2007, 2012).

4　接收函数方法及模型

本研究应用由Yuan等(2010)和Yuan(2015)发展的方法; ; 计算P波接收函数, 对主要的远震事件(M_s>5.8, 震中距大于30°)以及区域地震事件(M_b>5.2, 震中距20°~40°)进行了处理分析Dentith等, 2018; Li等, 2022; Zhao等, 2022). 在计算P波接收函数之前, 首先将事件波形降采样至20Hz, 然后进行去均值、去趋势, 并截取在理论P波到达时间前50s和后100s的窗口. 然后在SAC(Seismic Analysis Code)软件中将N-S和E-W分量分别旋转至径向和切向分量, 并用20s到2Hz的带通滤波器进行滤波. 接收函数的计算基于扩展的多窗口谱相关法(Park和Levin, 2000; Park等, 2004; Helffrich, 2006), 该方法使用背景噪声作为动态阻尼参数来稳定频率反褶积, 然后去除异常振幅(大于直达P波的0.8倍)和两倍全波形均方根值(或均值的标准差)选取径向接收函数.

4.1　*H*-*κ*方法

本研究基于Zhu和Kanamori(2000)最初提出的*H*-*κ*叠加技术, 对P-Moho-s转换震相及其表面多次反射波的接收函数振幅进行叠加. 该方法在很多区域有广泛应用(Yuan等, 2010; Yuan, 2015; Dentith等, 2018; Li等, 2022), 主要步骤参考Yuan等(2010). 本研究使用横向变化的P波背景速度模型(AuSREM地壳模型; Salmon等, 2013), 进行二维网格搜索(网络版附图S1, http://earthcn.scichina.com), 以找到Moho转换震相和表面多次波叠加振幅最大的莫霍面深度(H, 从15~55km, 0.5km间距)和波速比(κ, 从1.6~2.00, 0.01间

距). 搜索中我们根据共转换点CCP叠加方法(见下节), 初步限定台站下方Moho深度范围(附图S1), 该步骤极大提高了选取H和κ值的效率和可信度. 对于每个台站, 应用自举重采样法(Efron和Tibshirani, 1986)获得100组H和κ测量值, 并使用平均值和标准差作为最佳测量值和相关误差(附图S2). 单台H-κ结果(详见表S1)可由接收函数Moho震相及其多次波的理论以及实际到时比较(附图S1). 我们同时引入不同频段来验证结果的有效性(附图S1). 图2a和2b中的各台站之间Moho深度以及波速比通过单个台站测量结果并使用线性插值得到.

4.2　共转换点CCP叠加

接收函数共转换点叠加技术(Common-Conversion-Point, CCP)更有助于获取空间连续的Moho深度(Dueker和Sheehan, 1997; Yuan等, 2010). 该成像技术的另一个优势是可以通过CCP叠加中获得的Moho振幅来近似Moho锐度(Dueker和Sheehan, 1998; Delph和Porter, 2015). CCP模型是一个以(117°E, 24°S)为中心的三维模型区域(沿经纬度和深度分别为800km×800km×100km). 模型被划分为10km×10km×0.5km大小的网格. 用于H-κ叠加的接收函数波形, 总数约20000条, 进一步进行带通滤波(0.1~1Hz)和振幅归一化处理, 然后根据事件慢度/后方位角信息和横向变化的1D速度模型, 将其反投影至模型空间中. Yuan(2015)指出对于西澳克拉通台站, 这一波段可有效提高数据信噪比并压制部分台站的浅部盆地信号. 对于每个台站, 路径计算需要的P波和S波速度模型从AuSREM (Salmon等, 2013)的地壳(0~50km)和地幔(50~100km)模型中提取, 其中地壳S波速度则由插值得到的波速比(κ; 图2b)校正. 每个网格通过应用100组自举重采样方法(Efron和Tibshirani, 1986)获得平均振幅和标准差(近似模型误差, 附图S2).

4.3　Capricorn造山带地壳接收函数模型

在研究区域北部, 即太古代的Pilbara克拉通, 除了西北部的一部分地区(23°S以北和117°E以西), 地壳非常薄, 平均厚度为33.5km, V_P/V_S比值平均为1.72(图2).

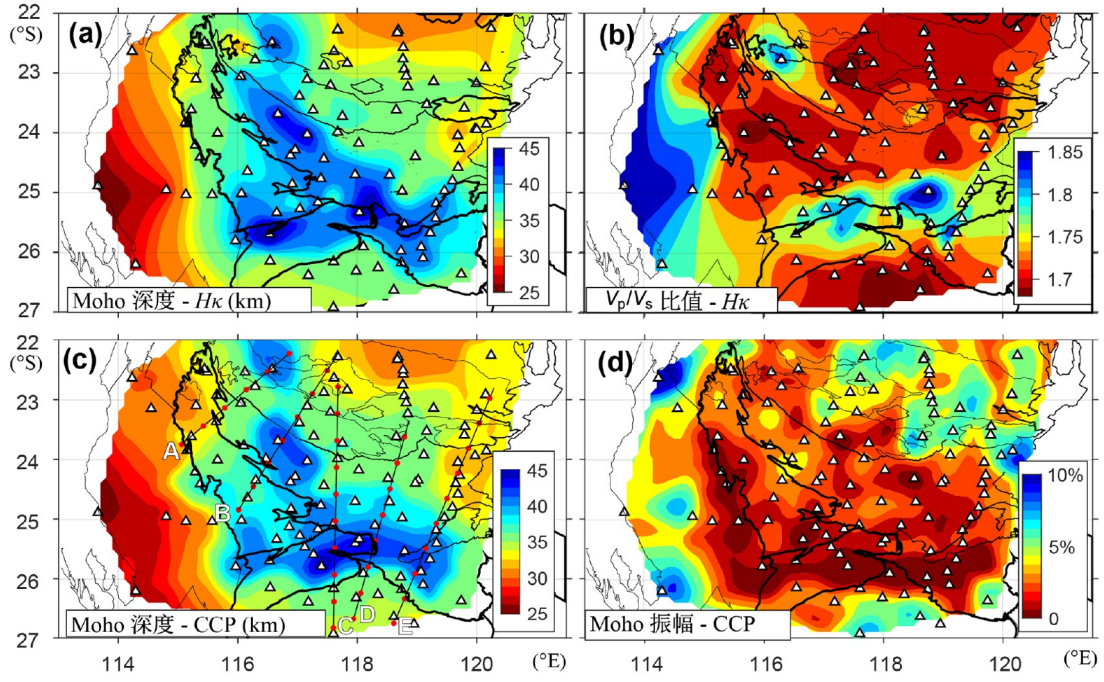


图 2　基于接收函数分析的地壳模型

(a和b)从单台H-κ测量插值的整体地壳厚度和V_P/V_S比值; (c)通过在(a)中选择莫霍面±2km范围内最大接收函数振幅而获得的地壳厚度, 黑线A-E为图6中CCP截面位置, 红点标记沿剖面每隔50km位置; (d)接收函数的莫霍面振幅(相对于直达P波), 用于近似莫霍面的变化幅度. 三角形表示台站位置

这些结果与Yuan(2015)在Pilbara克拉通其他区域的观测结果一致. Pilbara克拉通东部和中部的最古老区域的地壳最薄, 逐渐向南部的Hammersley和Fortescue盆地增厚. 从V_P/V_S比值推断, 地壳成分总体上呈现明显长英质特征. 研究区域内的莫霍面信号振幅最大(图2d), 表明在Pilbara克拉通下方, 莫霍面起伏非常剧烈. 这些在Pilbara克拉通的观测结果符合Abbott等(2013)所描述的未受改造的太古代地壳特征.

在Yilgarn克拉通的成像结果中, 地壳平均厚度为40.4km. V_P/V_S比值较高(约1.76), 表明地壳成分更接近中性. 然而, 该区域的地壳特征可以明显分为两个子区域: 包括Narryer地块和古元古代子盆地在内的Yilgarn克拉通北缘, 以及其以南的区域(26°S以南). 整体上, Yilgarn克拉通北缘地壳较厚(最大厚度超过40km), 其成分更接近中性(例如, Narryer地块内台站的平均地壳厚度为42.4km, V_P/V_S比值为1.77). 除去Narryer地块的Yilgarn克拉通地壳平均厚度为40.4km, V_P/V_S比值为1.76, 接近大陆平均地壳比值.

Capricorn造山带中部可以分为三个主要区域: 西部的Gascoyne省、东部的Collier盆地以及二者之间的过渡区域. Gascoyne省的地壳平均厚度为37.6km, 比Pilbara和Yilgarn克拉通略厚(图2). 该区域平均V_P/V_S比值为1.73, 表明Gascoyne省具有薄地壳和长英质成分, 这与Gascoyne省的太古代起源假说一致(Johnson等, 2011; Dentith等, 2018; Yuan和Bodin, 2018). Gascoyne省西部沿地体边界的Moho振幅非常弱, 其整体强度低于Pilbara克拉通, 并在空间上延伸至Edmund-Collier盆地内的Talga断层(图1中的TF). Capricorn东部Moho振幅比邻近的太古代单元的地壳要小(图2d).

5 Capricorn造山带地壳增生机制演化

基于Capricorn造山带新的地壳模型, 我们结合更新的区域同位素地壳形成年龄数据, 对Capricorn造山带各时期地壳增生模式机制进行进一步限制. 新结果显示在Capricorn造山带存在两种不同的地壳增生机制, 并表现为不同的地震特征.

5.1 克拉通地壳年龄采样

本研究整合了西澳大利亚的同位素Nd两阶段亏损地幔模型年龄数据集(T_{2DM}; Champion, 2013), 并加入Pilbara克拉通(Gardiner等, 2017)和Yilgarn克拉通(Witt等, 2020)的数据, 以及Lu等(2022)的最新测量结果. 更新的T_{2DM}年龄样本集近似代表该区域的地壳年龄(图3). 年龄样本主要分布在太古代的Pilbara和Yilgarn克拉通, 同时在Gascoyne省新增了少量样本. 线性插值处理后得到图3所示的年龄分布图. 由于被厚的盆地覆盖, Capricorn造山带大部分直接年龄数据采样很少.

结果显示, 区域内的Pilbara的东部和中部, 包括太

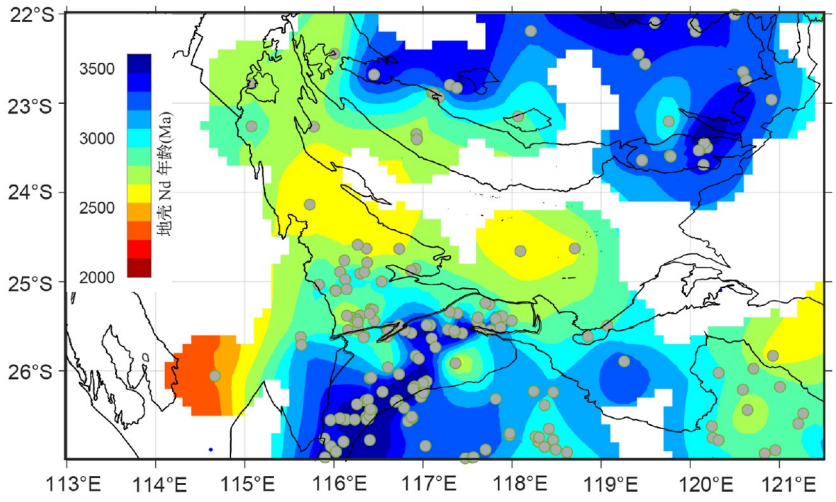


图 3 地壳形成年龄插值分布图

采样点如图灰色圆点所示, 数据来自Champion(2013)、Gardiner等(2017)、Witt等(2020)和Lu等(2022)

古代的Sylvania内围地块(图1中的SI)，地壳形成较早(>3.2Ga)；略北于Ashburton盆地的西南角地壳年龄较年轻(~3.0Ga)．Yilgarn克拉通的地壳年龄分布特征表现为西部整体年龄较老，特别是Narryer地体西部地壳年龄超过3.5Ga．超过3.2Ga的样本主要分布在Narryer地块的中、西地区, Yilgarn克拉通的西北角, 以及Marymia内围地块(图1中的MI). Narryer地体年龄明显呈现西老东新的趋势, 年龄相差接近0.5Ga. 较新的(~3.0Ga)年龄样本分布于Yilgarn克拉通的东南角．除了在Yilgran克拉通外部Canarvon盆地，区域最年轻的样本(新太古代)位于Gascoyne省中部，以及Capricorn造山带内部分盆地地区．Gascoyne省总体上比Pilbara和Yilgarn克拉通年轻, 南部的地壳相对北中部较老(>2.7Ga).

5.2　太古代地壳特征与年龄的相关性——垂直增生

我们将接收函数模型获取的地壳特征与形成年龄进行相关性分析(图4)，发现在研究区域内，形成时间早于32亿年地块(比如Pilbara、Yilgarn以及Narryer西部)，其平均地壳厚度以及波速比与地壳形成年龄呈大致的负相关趋势(图4a中实线箭头)，即地壳随年龄的减小有明显的增厚趋势，波速比随年龄的减小而增大(图4b中实线箭头)．例如，Pilbara克拉通的地壳厚度约为33km，V_P/V_S值为1.70(红色圆点)，地壳年龄为约3.2Ga；Yilgarn克拉通的地壳厚度约为37km，V_P/V_S比值为1.75(蓝色十字)，地壳年龄约为3.1Ga；Narryer地块的地壳厚度约为42km，平均V_P/V_S比值为1.76，地壳年龄约为3.0Ga.

相比于中古太古代地体，Capricorn造山带新太古代沉积盆地覆盖区域采样覆盖较少(图4)，地壳特征明显偏离之前的年龄负相关趋势．包括Gascoyne省在内，这些新太古代地壳的年龄整体分布较离散，部分地区的地壳厚度超过45km，V_P/V_S比值达到1.80．Gascoyne省大部分区域的地壳形成年龄集中在2.55~2.95Ga(紫色星号)，接近太古代地体的平均地壳厚度(~37km)和V_P/V_S比值(1.73).

Moho转换振幅与形成年龄同样具有相关性, 整体呈现正相关趋势(图4c中实线箭头)，即Moho振幅随地壳年龄的减小而减小, 表明Moho界面上的速度梯度也随着地壳年龄的变化而变化, 从大到小逐渐演化. 其中在Pilbara克拉通，Moho振幅最大，即Moho面速度跳变最大，符合未经后期改造的原始太古代地壳特征(Abbott等, 2013). 然而, 在Gascoyne省振幅值迅速下降(平均约为2%, 甚至更低). Yilgarn克拉通北缘Moho振幅值分布较离散，与Narryer地块的振幅值均较低．这一离散分布现象也存在于Capricorn造山带以及Gascoyne省区域．接收函数CCP波形显示(附图S3)，Pilbara克拉通的Moho接收函数振幅几乎一致且幅值较大, 而Yilgarn克拉通(包括Narryer地块)和Gascoyne省随着地壳的增厚, Moho振幅均有所下降.

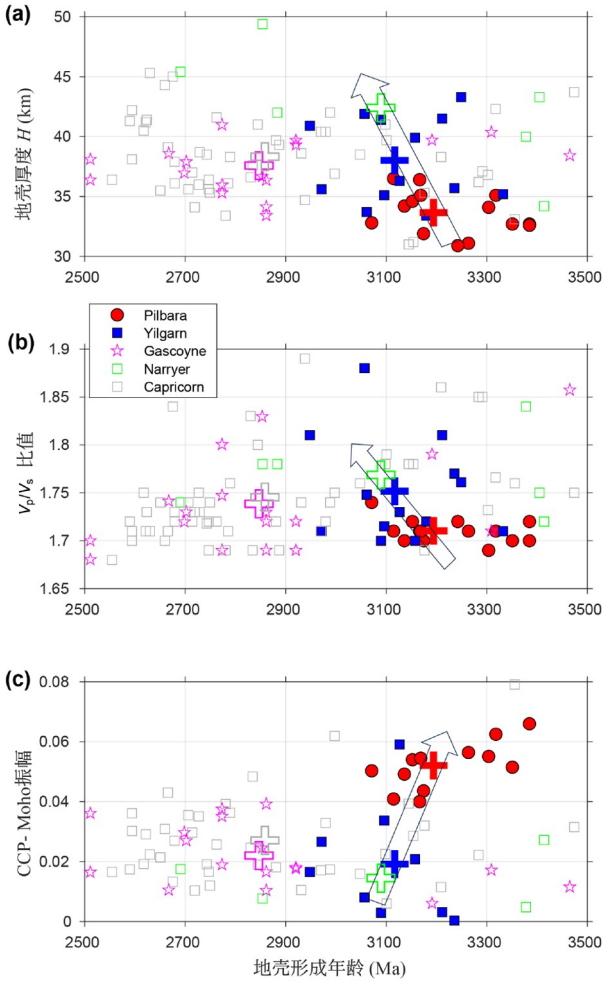


图 4　Capricorn造山带中太古代地壳特性的年龄相关趋势

(a) 地壳厚度(H)与地壳年龄; (b) V_P/V_S比值(κ)与地壳年龄; (c) 莫霍面振幅与地壳年龄．每个太古代地块的测量结果都用不同颜色表示(标签参考b图)．粗十字表示对应地块的平均值．注意实线箭头仅考虑太古代克拉通地块中对应关系(即Pilbara和Yilgarn克拉通)，呈明显正相关趋势；而Gascoyne省以及造山带中部盆地，受元古代造山及后期改造作用, 无明显趋势

新的地壳观测结果清晰地显示了研究区域内古-

中太古代构造单元地壳参数与年龄的相关性(图4, 实线箭头): 从3.5Ga到3.0Ga期间, 地壳随时间演化增厚, 而V_P/V_S比值同时增加, 表明在这一时期地壳成分从更长英质转变为中性. 新增的Moho振幅观测(图4c)显示, 随着时间演化, Moho振幅减小, 表明Moho锐度在古-中太古代逐渐变缓. 本文新观测结果, 与早期西澳克拉通稀疏台站的数据相结合, 进一步支持了Yuan (2015)提出的太古宙地壳演化动力学假设, 即地幔柱上涌与下地壳拆沉共同驱动太古宙地壳演化. 在早期太古宙, 多期次地幔柱上涌导致中地壳部分熔融(Bédard, 2006), 经过分异作用生成富长英质上地壳(Abbott等, 2013), 基性下地壳因重力作用拆沉移除, 使地壳减薄(约28~32km), Moho界面清晰(Levin等, 2016); 在太古宙晚期, 地幔潜温降低, 拆沉作用减缓, 使得更多基性下地壳保留, 进而表现地壳增厚(>40km), 成分由酸性向中性演化. 自元古代起, 俯冲增生逐渐主导(Wan等, 2020), 并与残余地幔柱活动共同塑造更厚、更复杂的地壳结构. 综上所述, 早期太古宙地壳特征受地幔柱上涌与下地壳拆沉控制, 晚期地壳增厚与成分演化则由地幔冷却与俯冲增生主导.

5.3 元古代地壳特征异常——水平增生和俯冲作用

图5a显示了研究区域内三个太古代构造单元和Capricorn造山带地壳厚度与V_P/V_S比值之间的关联性. 为便于比较, 图5还单独显示了Narryer地块的特征. 结果显示, 在太古代单元中大多数台站下方的地壳厚度与波速比呈现正相关关系, 即薄地壳通常具有较低的V_P/V_S比值(长英质), 而较厚的地壳通常具有较高的V_P/V_S值(中性到镁铁质). 这种正相关趋势在全球许多克拉通中都有记录(例如, Thompson等, 2010; Abbott等, 2013; Baranov和Bobrov, 2018). 如5.2中所述, 这可以通过下地壳拆沉过程的长期变化来解释, 其中下地壳残留导致地壳厚度和V_P/V_S比值的增加.

在H-κ正相关趋势之外, 还存在一些异常点. 这些异常分布在Narryer地块大部分地区、Yilgarn克拉通北缘、Pilbara克拉通最西端以及Gascoyne省东南缘(图5b). 在空间上, 这些异常点与具有较高V_P/V_S比值(中性到镁铁质成分)的两个厚地壳区域重合(图2c). 由于这些异常点靠近地块边缘, 我们推测这些区域的厚地壳成因可能与22亿年前的Ophthalmia和20亿年前的Glenburgh造山运动的两次主要碰撞事件直接相关, 而不是归因于克拉通的原始太古代地壳.

Yilgarn克拉通北缘的显著特征是增厚的地壳(大于40km), 中基性地壳(V_P/V_S比值大于1.76), 以及较小的莫霍面变化幅度(图2c). 接收函数CCP模型显示, Yilgarn北缘存在一个明显的持续向南倾斜的莫霍面(图6c、6d), 对应此处的莫霍面振幅极小值(图2d). 这种现象是前寒武纪碰撞带中的典型观测结果(例如, Snelson等, 1998; Yuan和Dueker, 2010; Thybo和Artemieva, 2013; Dentith等, 2018; Yuan和Bodin, 2018; Zhao等, 2022), 可能受控于改变地壳组分的改变、变形过程和热过程. 例如, 古俯冲过程中发生的岩浆底侵会显著增加下地壳中的新玄武质岩浆(例如, Bédard, 2006; Thybo和Artemieva, 2013), 从而导致地壳增厚和V_P/V_S比值升高. 因此, 这些地震学特征可能与20亿年前的Glenburgh造山运动直接有关.

另一个地壳增厚的区域始于Gascoyne省的东南缘, 并与Ashburton盆地的边缘大致平行(图2), 推测该

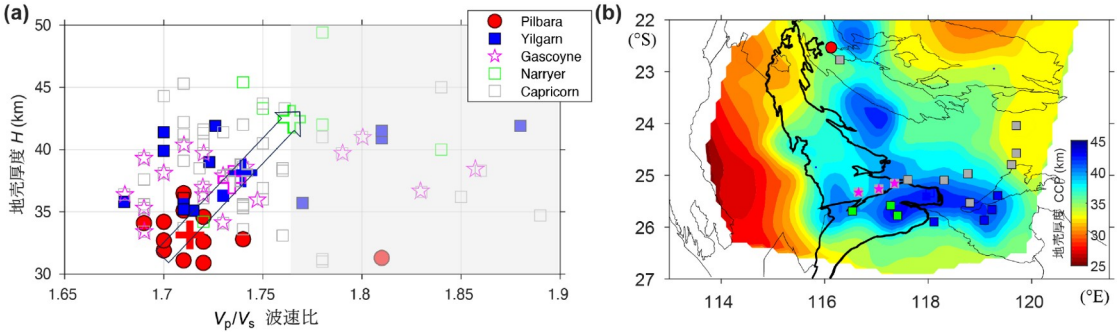


图 5 地壳厚度与V_P/V_S比值的相关性

(a)显示了太古代地块中地壳厚度与V_P/V_S的正相关趋势, 并指出了偏离趋势的异常测量结果(灰色区域), 这些异常值均大于1.76V_P/V_S波速比. 这些异常点的位置在(b)中由CCP模型得到的地壳厚度中对应标出. 注意, 异常点位置与较厚地壳的空间具有一致性

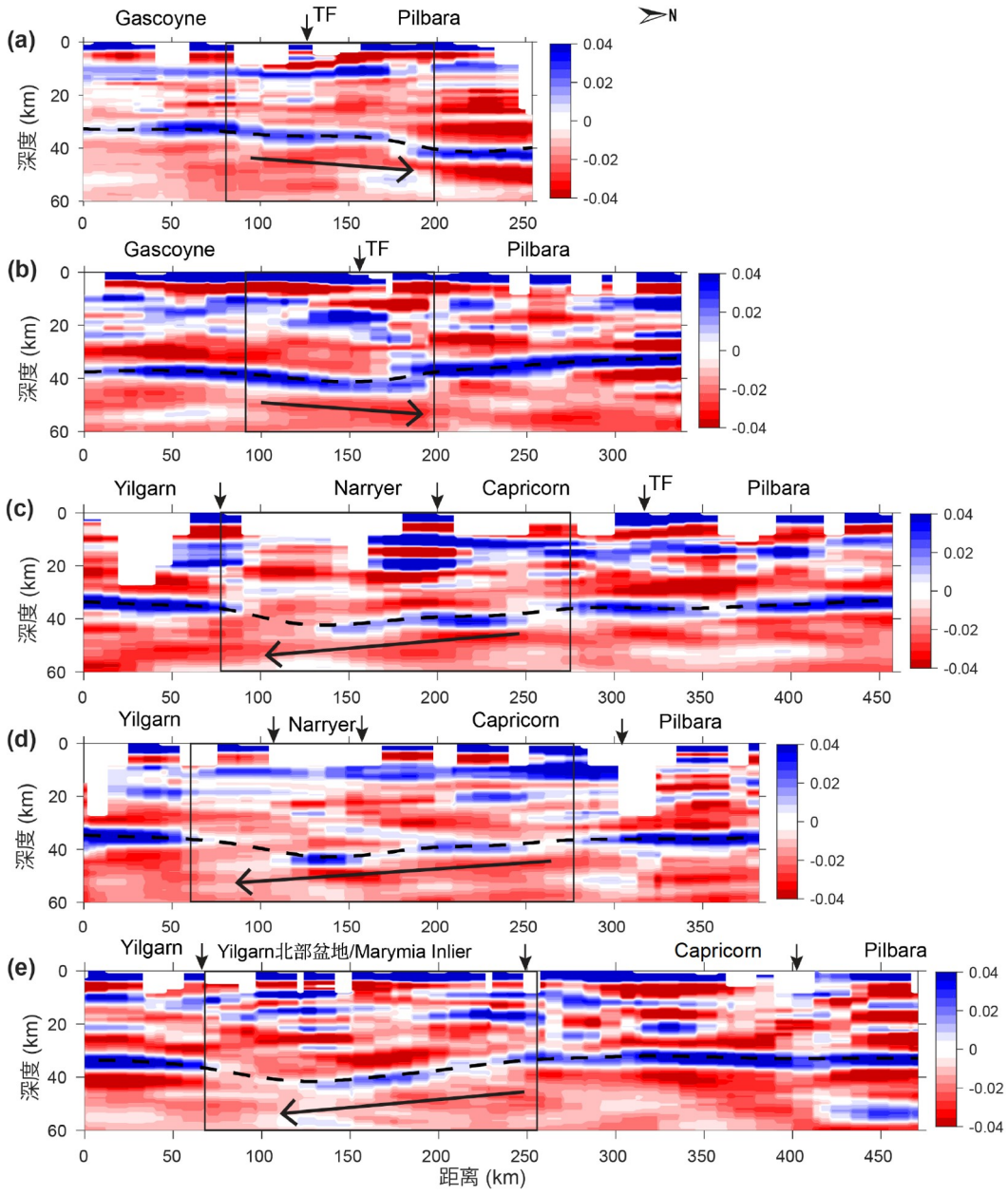


图 6　接收函数CCP截面

位置如图2c所示. 色标表示CCP模型中的接收函数振幅. 方框标定了倾斜莫霍面的大致范围, 箭头指示方向. 虚线为Moho深度. 地表标注了各地块名称及其边界(参见图1及图2c)

现象可能归因于2.2Ga Ophthalmia造山运动. Ashburton盆地以北的地壳较厚, 但该区域的数据覆盖较少. Ashburton盆地被解释为与古俯冲相关的前陆盆地(Johnson等, 2011), 但由此俯冲引起的弧岩浆作用在地表基本缺失. 根据深反射剖面10GA-CP2揭示的大规模地壳断层, 俯冲的极性可能是西南向的(Johnson等, 2013). 然而, 这一极性尚有争论(Johnson等, 2011). 尽管如此, 我们认为如果该区域的地壳增厚是由22亿年前Pilbara克拉通和Gascoyne省碰撞-拼合事件所造成的, 那么这一特征有助于界定Pilbara克拉通和Gascoyne省的深部边界(图6b).

值得注意的是, 在西澳克拉通(WAC)拼合之后,

Capricorn造山带经历了超过10亿年的地壳改造作用(例如, Cawood和Korsch, 2008; Johnson等, 2013, 2017; Korhonen和Johnson, 2015). 可能受到远端板块作用力的影响, 发生一系列陆内裂解作用和造山过程. 通过年轻岩浆的注入和反复的分异作用, 使得地壳结构和成分极其复杂(Johnson等, 2013, 2017; Korhonen和Johnson, 2015). 因此, 很难建立地壳年龄与地震学特征之间的稳定关系. 另一方面, 沿太古代地块边缘出现的地震学观测异常的空间聚类(图5)表明, 这些边缘是流变学上的薄弱带, 也是后续构造-热事件的应变集中带(Thomas, 2006; Johnson等, 2013). 我们认为, 太古代以后的地壳碰撞和改造导致了Capricorn造山带增厚的地壳、高V_P/V_S比值、较小的莫霍面振幅和倾斜的莫霍面等特征.

6 Capricorn造山带古元古代俯冲作用

Capricorn造山带经历了22和20亿年的两次陆陆碰撞, 最终形成了西澳克拉通(Johnson等, 2011). 对应的两个地壳增厚区域(图2c)都具有大尺度特征, 宽约100km, 沿走向延伸超过300km. 区域莫霍面呈不对称倾斜, 并在双莫霍面附近结束(图6). 在主动源反射剖面中, 莫霍面的倾斜还伴随着Moho以下同一方向倾斜的反射体: 主动源反射剖面10GA-CP3中显示Narryer地块中央的莫霍面下方明显存在南倾的反射体(Calvert等, 2021); 10GA-CP1&2剖面显示沿Pilbara西南缘存在向北倾斜的反射体(Dentith等, 2018). 这种分布在边缘范围内倾斜的莫霍面和对应倾斜的上地幔反射体是明显的古俯冲地震学印记. 如果这一解释是正确的, 可能进一步表明前寒武纪时期的俯冲作用在22~20亿年前Capricorn造山带的碰撞事件中就已经发生, 并与板块俯冲在全球占主导作用的时间(约20亿年)一致(Wan等, 2020). 结合CCP模型(图6)和动力学模拟(图7), 我们可以对两次造山过程的俯冲过程提供更多的深部约束.

6.1 古俯冲的几何形态

通常认为, 造山带地壳中残留的莫霍面倾斜方向代表早期拼合时期陆陆碰撞过程中的俯冲方向(Zhao等, 2022). Capricorn造山带的南北两侧分别与古太古代的Pilbara和Yilgarn克拉通岩石圈相连接, 而造山带下方岩石圈年龄则相对年轻(图4). 22和20亿年的两次陆陆碰撞过程, 两侧克拉通与Capricorn造山带的岩石圈相互作用可以通过动力学数值模型(Sizova等, 2014)来解释, 如图7所示. 在碰撞过程中, 由于岩石圈强度不同, 较强的克拉通岩石圈在碰撞边界形成构造楔(Snyder, 2002), 其内部变形较小, 莫霍面较平直; 而较弱的造山带岩石圈则沿着构造楔下缘继续俯冲, 形成明显倾斜的莫霍面. 动力学模拟得到的莫霍面特征, 与地震学模型指示的倾斜莫霍面和上地幔反射体有很好的对应.

6.2 22亿年Ophthalmia造山作用的俯冲特征

在2215~2145Ma Ophthalmia造山作用期间, Gascoyne地体与Pilbara克拉通发生碰撞(Occhipinti等, 2004; Johnson等, 2011). 然而, 在Pilbara克拉通西南缘或Gascoyne地体东北缘并未发现相关的弧岩浆. 对于这一碰撞过程, 不同研究提出相反的俯冲极性, 即北向或南向俯冲(Cawood和Tyler, 2004; Johnson等, 2017). 最近的地球物理研究(Dentith等, 2018; Yuan和Bodin, 2018)对Gascoyne省中部深反射测线10GA-CP2下方的两个向北倾斜的反射信号进行了新的解释. Dentith等(2018)认为Gascoyne省东北缘是由一系列起源未知的小地块组成. 如果属实, 那么东北向的古俯冲作用将会使这些未知的小地块拼合到Pilbara克拉通的西南缘. 然而, 我们并未观测到这一俯冲事件明显的地震学特征. 尽管CCP模型显示Gascoyne省东北向倾斜的莫霍面(图6a、6b), 但在该区域, 地震观测相对稀疏, 尤其是在地壳增厚的区域之间(图2), 地壳厚度存在不连续性. Gascoyne省倾斜的莫霍面并未一直持续到Pilbara克拉通下方, 与动力学模拟显示的南北莫霍面特征不一致. 因此难以确定22亿年前古俯冲的极性.

6.3 20亿年Glenburgh造山作用的俯冲特征

同位素和地球化学研究(Sheppard等, 2004; Johnson等, 2011)表明, 在20亿年前Glenburgh造山事件期间的岩浆作用发生在Glenburgh地体南缘的大陆边缘. 这一解释意味着在Glenburgh地体之下发生了北向安第斯型俯冲, 并将Narryer地块直接与Gascoyne省的Glenburgh地体拼接(Occhipinti等, 2004; Sheppard等, 2004; Johnson等, 2013). 需要注意的是, 这一现象仅针对于Yilgarn克拉通北部的Narryer地体, 而Yilgarn克拉通北

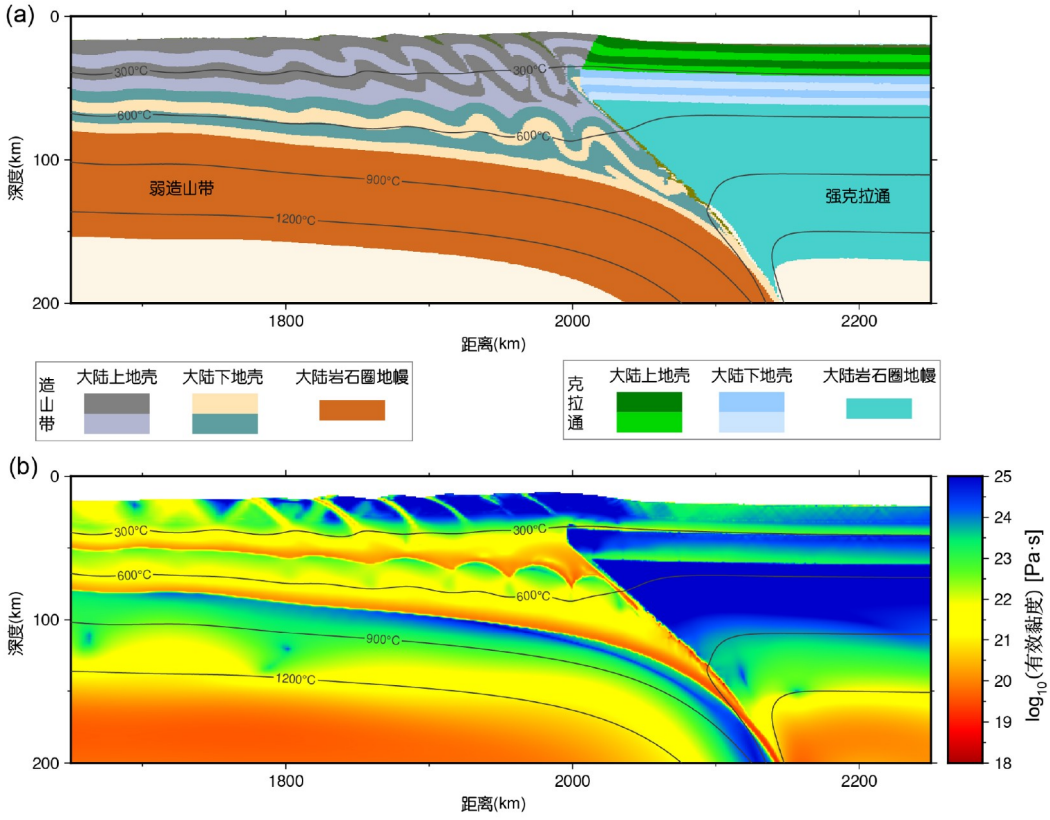


图 7　动力学模拟的新太古代-古元古代时期造山带与克拉通碰撞拼贴(a)和有效黏度(b)示意图

左侧较弱的造山带在碰撞过程中, 地壳发生强烈变形缩短, 形成的褶皱逆冲带堆积在碰撞前沿. 图中黑色线条为温度等值线. 模型设置见附图S6

缘其他部分则被广泛的年轻盆地覆盖，因此无法判定这个北向安第斯型俯冲是否在整个Yilgarn克拉通北缘具有连续性. 主动源10GA-CP3测线显示, 从Glenburgh地体向南, 在Narryer地体下方有明显南向倾斜的Moho信号(图8a; Kennett和Saygin, 2015; Calvert等, 2021). 该信号整体与CCP模型一致(图8b)，并延伸到Narryer地体岩石圈中形成一个南向的地幔反射体(M1).

6.4　20亿年Glenburgh造山作用的构造模型与解释

Glenburgh地体南向俯冲的地震学特征与地球化学证据揭示的北向俯冲明显不同. 针对该区域的俯冲极性及机制争议，Calvert等(2021)提出南向倾斜的Moho面和上地幔反射体可能源自28亿年前Narryer地块与Yilgarn克拉通的拼合过程，或18亿年前的短暂的南向陆内造山(Capricorn造山运动)，并非20亿年前Glenburgh造山事件的俯冲过程.

然而，Calvert等(2021)的模型仅局限Yilgarn西北部的Narryer地体以及北部相邻Gascoyne省中的Glenburgh地体. 我们的观测显示，造山带盆地下方南向倾斜的莫霍面现象在Yilgarn北缘普遍存在(图6c~6e)，与此对应，克拉通内部的莫霍面平直，与动力学模拟结果吻合. 相较于短暂而小规模的Capricorn陆内造山事件，其影响范围可能仅限于部分Yilgarn边缘，如此普遍存在的倾斜莫霍面更可能由一个比Narryer地块与Yilgarn碰撞更大规模的岩石圈变形活动. 因此, 我们推测该变形更可能是由~20亿年Yilgarn地体与北侧的Pilbara-Gascoyne联合体拼合共同形成西澳克拉通的造山事件引起，并提出在双向俯冲(图9)或俯冲极性反转过程中(Snyder等, 1996; Tyson等, 2002; Yuan和Dueker, 2005), 其中较短的洋盆闭合可能会在Narryer地块的南缘形成短暂的南向俯冲，导致了地震学观测中的南向倾斜Moho以及地幔反射体. 但是，这种短暂的俯冲不足以导致任何弧岩浆活动(Tyson等, 2002). 由于早期地幔温度高(Herzberg等, 2010)，下行板块流变性较弱,

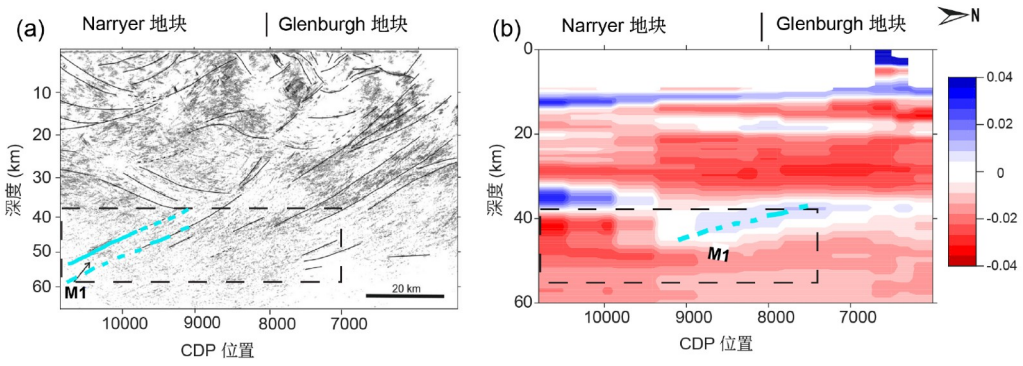


图 8　主动源反射剖面10GA-CP3(a)和(b)沿10GA-CP3截取的接收函数CCP剖面的比较

(a)修改自Calvert等(2021). 虚线矩形区域表示接收函数中的向南倾斜的莫霍面在共转换点位置10000附近可能达到双莫霍面; 在莫霍面下方明显存在向南倾斜的反射体(M1, 绿色虚线)

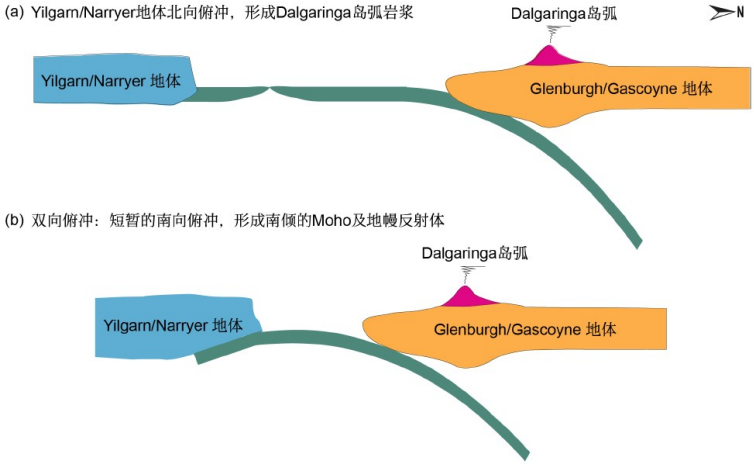


图 9　基于COPA台阵南向倾斜Moho特征的构造模型

在~20亿年Glenburgh构造运动中, Yilgarn克拉通(包括古老的Narryer地体)与Pilbara-Gascoyne联合地体拼合形成西澳大利亚克拉通过程中可能发生的双俯冲过程. 南向的俯冲过程较短, 因此无充分的岛弧岩浆出露, 但是形成了南向倾斜的Moho以及地幔反射体. Dalgaringa岛弧为Glenburgh地体中岛弧岩浆出露部分(Johnson等, 2011)

短暂的俯冲可能是一种普遍现象(Moyen和van Hunen, 2012). 然而, 这种推测需要进一步的深部地震学和地球化学证据加以约束, 从而排除28亿年Narryer地块与Yilgarn克拉通的拼合, 以及西克拉通化之后陆内裂谷和造山事件的影响(Occhipinti等, 2017).

7　结论

本研究的接收函数结果表明, 在太古代最后的十亿年中, 该区域的地壳性质演化与地壳年龄具有明显的相关性, 即较老的太古代地壳较薄且成分偏长英质, 而在太古代末期, 地壳明显增厚且成分偏中性. 较厚且基性的地壳主要沿地块边缘分布, 例如Yilgarn克拉通的北缘, 以及Pilbara克拉通与Gascoyne省之间的边界. 由于这些地块边缘是在两次主要的古元古代碰撞事件, 即2.2Ga的Ophthalmia造山运动和2.0Ga的Glenburgh造山运动期间形成的, 本研究认为与造山运动相关的变形和热过程对当前地壳结构变化起到了主要控制作用, 导致地壳增厚且基性成分. 克拉通化后的地壳改造和再熔融过程可能为老地壳中添加了新物质, 并随后发生分异, 使得对造山带中的元古代盆地的地震学探测变得复杂. 在地块边缘, 较厚的地壳中发现了连续的大规模倾斜的莫霍面和地幔反射体. 这些观测结果与许多前寒武纪俯冲带的地壳地震特征相似, 从

而提供了至少发生在20亿年甚至22亿年前的古元古代俯冲作用的地震学证据, 支持与地表地质学和岩石学限定显著不同的俯冲极性. 本研究为更好地理解西澳克拉通的构造历史提供了新的深部地震学证据, 丰富了对克拉通地壳结构的认识.

致谢　COPA地震台阵受西澳大利亚地质调查局、澳大利亚科学与工业资助基金会, 以及澳大利亚基金委地球液体系统研究中心资助. 感谢西澳大学提供计算资源和支持.

参考文献

吴福元, 徐义刚, 朱日祥, 张国伟. 2014. 克拉通岩石圈减薄与破坏. 中国科学: 地球科学, 44: 2358–2372

翟明国, 赵磊, 祝禧艳, 焦淑娟, 周艳艳, 周李岗. 2020. 早期大陆与板块构造启动——前沿热点介绍与展望. 岩石学报, 36: 2249–2275

郑永飞, 陈伊翔. 2019. 大陆俯冲带壳幔相互作用. 地球科学, 44: 3961–3983

郑永飞, 陈伊翔, 陈仁旭, 戴立群. 2022. 汇聚板块边缘构造演化及其地质效应. 中国科学: 地球科学, 52: 1213–1242

朱日祥, 徐义刚, 朱光, 张宏福, 夏群科, 郑天愉. 2012. 华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 42: 1135–1159

Abbott D H, Mooney W D, VanTongeren J A. 2013. The character of the Moho and lower crust within Archean cratons and the tectonic implications. Tectonophysics, 609: 690–705

Aitken A R A, Banasazczyk S, Dentith M C, Lindsay M, Shragge J, Pina-Varas P, Annetts D, Austin J, Ley-Cooper Y, Monday T, Kennett B L N, Murdie R, Yuan H. 2015. A major geophysical experiment in the Capricorn orogeny, western Australia. ASEG Extended Abstracts, 2015: 1–5

Assumpção M, Feng M, Tassara A, Julià J. 2013. Models of crustal thickness for South America from seismic refraction, receiver functions and surface wave tomography. Tectonophysics, 609: 82–96

Audet P, Bostock M G, Christensen N I, Peacock S M. 2009. Seismic evidence for overpressured subducted oceanic crust and megathrust fault sealing. Nature, 457: 76–78

Baranov A A, Bobrov A M. 2018. Crustal structure and properties of Archean cratons of Gondwanaland: Similarity and difference. Russ Geol Geophys, 59: 512–524

Bédard J H. 2006. A catalytic delamination-driven model for coupled genesis of Archaean crust and sub-continental lithospheric mantle. Geochim Cosmochim Acta, 70: 1188–1214

Bédard J H. 2018. Stagnant lids and mantle overturns: Implications for Archaean tectonics, magmagenesis, crustal growth, mantle evolution, and the start of plate tectonics. Geosci Front, 9: 19–49

Ben Mansour W, England R W, Fishwick S, Moorkamp M. 2018. Crustal properties of the northern Scandinavian mountains and Fennoscandian shield from analysis of teleseismic receiver functions. Geophys J Int, 214: 386–401

Borah K, Rai S S, Gupta S, Prakasam K S, Kumar S, Sivaram K. 2014. Preserved and modified mid-Archean crustal blocks in Dharwar craton: Seismological evidence. Precambrian Res, 246: 16–34

Bostock M G. 1997. Anisotropic upper-mantle stratigraphy and architecture of the Slave craton. Nature, 390: 392–395

Bostock M G. 2013. The Moho in subduction zones. Tectonophysics, 609: 547–557

Calvert A J, Sawyer E W, Davis W J, Ludden J N. 1995. Archaean subduction inferred from seismic images of a mantle suture in the Superior Province. Nature, 375: 670–674

Calvert A J, Doublier M P, Sellars S E. 2021. Seismic reflections from a lithospheric suture zone below the Archaean Yilgarn Craton. Nat Commun, 12: 7245

Cawood P A, Tyler I M. 2004. Assembling and reactivating the Proterozoic Capricorn Orogen: Lithotectonic elements, orogenies, and significance. Precambrian Res, 128: 201–218

Cawood P A, Korsch R J. 2008. Assembling Australia: Proterozoic building of a continent. Precambrian Res, 166: 1–35

Champion D C. 2013. Neodymium depleted mantle model age map of Australia: Explanatory notes and user guide. Geoscience Australia, Record 2013/044, doi: 10.11636/Record.12013.11044

Chen C W, Rondenay S, Evans R L, Snyder D B. 2009. Geophysical detection of relict metasomatism from an Archean (~3.5 Ga) subduction zone. Science, 326: 1089–1091

Chevrot S, van der Hilst R D. 2000. The Poisson ratio of the Australian crust; geological and geophysical implications. Earth Planet Sci Lett, 183: 121–132

Chowdhury P, Gerya T, Chakraborty S. 2017. Emergence of silicic continents as the lower crust peels off on a hot plate-tectonic Earth. Nat Geosci, 10: 698–703

Clitheroe G, Gudmundsson O, Kennett B L N. 2000. The crustal thickness of Australia. J Geophys Res, 105: 13697–13713

Clowes R M, White D J, Hajnal Z. 2010. Mantle heterogeneities and their significance: Results from Lithoprobe seismic reflection and refraction-wide-angle reflection studies. Can J Earth Sci, 47: 409–443

Condie K. 2015. Changing tectonic settings through time: Indiscriminate use of geochemical discriminant diagrams. Precambrian Res, 266: 587–591

Darbyshire F A, Bastow I D, Petrescu L, Gilligan A, Thompson D A. 2017. A tale of two orogens: Crustal processes in the Proterozoic Trans-Hudson and Grenville Orogens, eastern Canada. Tectonics,

36: 1633–1659

Darbyshire F A, Dahl-Jensen T, Larsen T B, Voss P H, Joyal G. 2018. Crust and uppermost-mantle structure of Greenland and the Northwest Atlantic from Rayleigh wave group velocity tomography. Geophys J Int, 212: 1546–1569

Delph J R, Porter R C. 2015. Crustal structure beneath southern Africa: Insight into how tectonic events affect the Mohorovi i discontinuity. Geophys J Int, 200: 254–264

Dentith M, Yuan H, Murdie R E, Pina-Varas P, Johnson S P, Gessner K, Korhonen F J. 2018. Improved interpretation of deep seismic reflection data in areas of complex geology through integration with passive seismic data sets. J Geophys Res-Solid Earth, 123: 10810–10830

Dueker K G, Sheehan A F. 1997. Mantle discontinuity structure from midpoint stacks of converted P to S waves across the Yellowstone hotspot track. J Geophys Res, 102: 8313–8327

Dueker K G, Sheehan A F. 1998. Mantle discontinuity structure beneath the Colorado Rocky Mountains and high plains. J Geophys Res, 103: 7153–7169

Durrheim R J, Mooney W D. 1991. Archean and Proterozoic crustal evolution: Evidence from crustal seismology. Geology, 19: 606

Eaton D W, Cassidy J F. 1996. A relic proterozoic subduction zone in western Canada: New evidence from seismic reflection and receiver function data. Geophys Res Lett, 23: 3791–3794

Efron B, Tibshirani R. 1986. Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy. Statist Sci, 1: 54–77

Gardiner N J, Hickman A H, Kirkland C L, Lu Y, Johnson T, Zhao J X. 2017. Processes of crust formation in the early Earth imaged through Hf isotopes from the East Pilbara Terrane. Precambrian Res, 297: 56–76

Gessner K, Yuan H, Murdie R, Dentith M C, Johnson S P, Brett J. 2015. The Capricorn Orogen Passive source Array (COPA) in Western Australia. San Francisco: AGU 2015 Fall Meeting Volume T11B-2883

Gilligan A, Bastow I D, Darbyshire F A. 2016. Seismological structure of the 1.8 Ga Trans-Hudson Orogen of North America. Geochem Geophys Geosyst, 17: 2421–2433

Gorman A R, Clowes R M, Ellis R M, Henstock T J, Spence G D, Keller G R, Levander A, Snelson C M, Burianyk M J, Kanasewich E R, Asudeh I, Hajnal Z, Miller K C. 2002. Deep probe: Imaging the roots of western North America. Can J Earth Sci, 39: 375–398

Haldar C, Kumar P, Ravi Kumar M, Ray L, Srinagesh D. 2018. Seismic evidence for secular evolution and alteration of Archaean crust in Indian shield. Precambrian Res, 304: 12–20

Hansen S, Dueker K. 2009. P- and S-wave receiver function images of crustal imbrication beneath the cheyenne belt in southeast Wyoming. Bull Seismol Soc Am, 99: 1953–1961

Harrison T M. 2009. The Hadean crust: Evidence from >4 Ga zircons. Annu Rev Earth Planet Sci, 37: 479–505

Hawkesworth C J, Cawood P A, Dhuime B, Kemp T I S. 2017. Earth's continental lithosphere through time. Annu Rev Earth Planet Sci, 45: 169–198

Hawkesworth C, Cawood P, Dhuime B. 2013. Continental growth and the crustal record. Tectonophysics, 609: 651–660

Helffrich G. 2006. Extended-time multitaper frequency domain cross-correlation receiver-function estimation. Bull Seismol Soc Am, 96: 344–347

Herzberg C, Condie K, Korenaga J. 2010. Thermal history of the Earth and its petrological expression. Earth Planet Sci Lett, 292: 79–88

Johnson S P, Sheppard S, Rasmussen B, Wingate M T D, Kirkland C L, Muhling J R, Fletcher I R, Belousova E A. 2011. Two collisions, two sutures: Punctuated pre-1950 Ma assembly of the West Australian Craton during the Ophthalmian and Glenburgh Orogenies. Precambrian Res, 189: 239–262

Johnson S P, Thorne A M, Tyler I M, Korsch R J, Kennett B L N, Cutten H N, Goodwin J, Blay O, Blewett R S, Joly A, Dentith M C, Aitken A R A, Holzschuh J, Salmon M, Reading A, Heinson G, Boren G, Ross J, Costelloe R D, Fomin T. 2013. Crustal architecture of the Capricorn Orogen, Western Australia and associated metallogeny. Aust J Earth Sci, 60: 681–705

Johnson S P, Korhonen F J, Kirkland C L, Cliff J B, Belousova E A, Sheppard S. 2017. An isotopic perspective on growth and differentiation of Proterozoic orogenic crust: From subduction magmatism to cratonization. Lithos, 268-271: 76–86

Johnson T E, Brown M, Kaus B J P, Van Tongeren J A. 2014. Delamination and recycling of Archaean crust caused by gravitational instabilities. Nat Geosci, 7: 47–52

Kachingwe M, Nyblade A, Julià J. 2015. Crustal structure of Precambrian terranes in the southern African subcontinent with implications for secular variation in crustal genesis. Geophys J Int, 202: 533–547

Keller C B, Schoene B. 2012. Statistical geochemistry reveals disruption in secular lithospheric evolution about 2.5 Gyr ago. Nature, 485: 490–493

Kennett B L N, Saygin E. 2015. The nature of the Moho in Australia from reflection profiling: A review. GeoResJ, 5: 74–91

Korhonen F J, Johnson S P. 2015. The role of radiogenic heat in prolonged intraplate reworking: The Capricorn Orogen explained? Earth Planet Sci Lett, 428: 22–32

Lee C T A, Yeung L Y, McKenzie N R, Yokoyama Y, Ozaki K, Lenardic A. 2016. Two-step rise of atmospheric oxygen linked to the growth of continents. Nat Geosci, 9: 417–424

Levin V, VanTongeren J A, Servali A. 2016. How sharp is the sharp

Archean Moho? Example from eastern Superior Province. Geophys Res Lett, 43: 1928–1933
Li T, Jiang M, Zhao L, Yao W, Chen L, Chu Y, Sun B, Ai Y, Wan B, Gessner K, Yuan H. 2022. Wedge tectonics in south China: Constraints from new seismic data. Sci Bull, 67: 1496–1507
Lloyd S, van der Lee S, França G S, Assumpção M, Feng M. 2010. Moho map of South America from receiver functions and surface waves. J Geophys Res, 115: 2009JB006829
Lowrey J R, Wyman D A, Ivanic T J, Smithies R H, Maas R. 2019. Archean boninite-like rocks of the northwestern Youanmi Terrane, Yilgarn Craton: Geochemistry and genesis. J Petrol, 60: 2131–2168
Lu Y, Wingate M T D, Smithies R H, Gessner K, Johnson S P, Kemp A I S, Kelsey D E, Haines P W, Martin D M B, Martin L, Lindsay M. 2022. Preserved intercratonic lithosphere reveals Proterozoic assembly of Australia. Geology, 50: 1202–1207
Martin D M B, Thorne A M. 2004. Tectonic setting and basin evolution of the Bangemall Supergroup in the northwestern Capricorn Orogen. Precambrian Res, 128: 385–409
Moyen J F, van Hunen J. 2012. Short-term episodicity of Archaean plate tectonics. Geology, 40: 451–454
Nábělek J, Hetényi G, Vergne J, Sapkota S, Kafle B, Jiang M, Su H, Chen J, Huang B S, Team H C. 2009. Underplating in the Himalaya-Tibet collision zone revealed by the Hi-CLIMB experiment. Science, 325: 1371–1374
Occhipinti S A, Sheppard S, Passchier C, Tyler I M, Nelson D R. 2004. Palaeoproterozoic crustal accretion and collision in the southern Capricorn Orogen: The Glenburgh Orogeny. Precambrian Res, 128: 237–255
Occhipinti S, Hocking R, Lindsay M, Aitken A, Copp I, Jones J, Sheppard S, Pirajno F, Metelka V. 2017. Paleoproterozoic basin development on the northern Yilgarn Craton, Western Australia. Precambrian Res, 300: 121–140
O'Neil J, Carlson R W. 2017. Building Archean cratons from Hadean mafic crust. Science, 355: 1199–1202
O'Reilly S Y, Griffin W L. 2013. Moho vs crust-mantle boundary: Evolution of an idea. Tectonophysics, 609: 535–546
Park J, Levin V. 2000. Receiver functions from multiple-taper spectral correlation estimates. Bull Seismol Soc Am, 90: 1507–1520
Park J, Yuan H, Levin V. 2004. Subduction zone anisotropy beneath Corvallis, Oregon: A serpentinite skid mark of trench-parallel terrane migration? J Geophys Res, 109: 2003JB002718
Pasyanos M E, Nyblade A A. 2007. A top to bottom lithospheric study of Africa and Arabia. Tectonophysics, 444: 27–44
Petrescu L, Bastow I D, Darbyshire F A, Gilligan A, Bodin T, Menke W, Levin V. 2016. Three billion years of crustal evolution in eastern Canada: Constraints from receiver functions. J Geophys Res-Solid Earth, 121: 788–811
Reading A M, Kennett B L N. 2003. Lithospheric structure of the Pilbara Craton, Capricorn Orogen and northern Yilgarn Craton, Western Australia, from teleseismic receiver functions. Aust J Earth Sci, 50: 439–445
Reading A M, Kennett B L N, Goleby B. 2007. New constraints on the seismic structure of West Australia: Evidence for terrane stabilization prior to the assembly of an ancient continent? Geology, 35: 379
Reading A M, Tkalčić H, Kennett B L N, Johnson S P, Sheppard S. 2012. Seismic structure of the crust and uppermost mantle of the Capricorn and Paterson Orogens and adjacent cratons, Western Australia, from passive seismic transects. Precambrian Res, 196-197: 295–308
Rudnick R L, Gao S. 2003. 3.01-Composition of the Continental Crust. In: Turekian H D H K, eds. Treatise on Geochemistry. Oxford: Pergamon. 1–64
Salmon M, Kennett B L N, Saygin E. 2013. Australian seismological reference model (AuSREM): Crustal component. Geophys J Inter, 192: 190–206
Saygin E, Kennett B L N. 2010. Ambient seismic noise tomography of Australian continent. Tectonophysics, 481: 116–125
Saygin E, Kennett B L N. 2012. Crustal structure of Australia from ambient seismic noise tomography. J Geophys Res, 117: 2011JB008403
Schulte-Pelkum V, Monsalve G, Sheehan A, Pandey M R, Sapkota S, Bilham R, Wu F. 2005. Imaging the Indian subcontinent beneath the Himalaya. Nature, 435: 1222–1225
Sheppard S, Occhipinti S A, Tyler I M. 2004. A 2005–1970 Ma Andean-type batholith in the southern Gascoyne Complex, Western Australia. Precambrian Res, 128: 257–277
Sheppard S, Occhipinti S A, Nelson D R. 2005. Intracontinental reworking in the Capricorn Orogen, Western Australia: The 1680–1620 Ma Mangaroon Orogeny. Aust J Earth Sci, 52: 443–460
Sheppard S, Fletcher I R, Rasmussen B, Zi J W, Muhling J R, Occhipinti S A, Wingate M T D, Johnson S P. 2016. A new Paleoproterozoic tectonic history of the eastern Capricorn Orogen, Western Australia, revealed by U-Pb zircon dating of micro-tuffs. Precambrian Res, 286: 1–19
Sizova E, Gerya T, Brown M. 2014. Contrasting styles of Phanerozoic and Precambrian continental collision. Gondwana Res, 25: 522–545
Snelson C M, Henstock T J, Keller G R, Miller K C, Levander A. 1998. Crustal and uppermost mantle structure along the Deep Probe seismic profile. Rocky Mountain Geol, 33: 181–198
Snyder D B. 2002. Lithospheric growth at margins of cratons. Tectonophysics, 355: 7–22
Snyder D B, Goleby B R. 2016. Seismic reflection patterns associated with continental convergent margins through time. Tectonophysics,

692: 3–13

Snyder D B, Prasetyo H, Blundell D J, Pigram C J, Barber A J, Richardson A, Tjokosaproetro S. 1996. A dual doubly vergent orogen in the Banda Arc continent-arc collision zone as observed on deep seismic reflection profiles. Tectonics, 15: 34–53

Tang M, Chen K, Rudnick R L. 2016. Archean upper crust transition from mafic to felsic marks the onset of plate tectonics. Science, 351: 372–375

Thomas W A. 2006. Tectonic inheritance at a continental margin. GSA Today, 16, doi: 10.1130/1052-5173

Thompson D A, Bastow I D, Helffrich G, Kendall J M, Wookey J, Snyder D B, Eaton D W. 2010. Precambrian crustal evolution: Seismic constraints from the Canadian Shield. Earth Planet Sci Lett, 297: 655–666

Thybo H, Artemieva I M. 2013. Moho and magmatic underplating in continental lithosphere. Tectonophysics, 609: 605–619

Tugume F, Nyblade A, Julià J, van der Meijde M. 2013. Precambrian crustal structure in Africa and Arabia: Evidence lacking for secular variation. Tectonophysics, 609: 250–266

Tyson A R, Morozova E A, Karlstrom K E, Chamberlain S.B. Smithson K.G. Dueker K R, Foster C T. 2002. Proterozoic Farwell Mountain-Lester Mountain suture zone, northern Colorado: Subduction flip and progressive assembly of arcs. Geology, 30: 943–946

van der Velden A J, Cook F A. 2005. Relict subduction zones in Canada. J Geophys Res, 110: 2004JB003333

Van Kranendonk M J, Hugh Smithies R, Hickman A H, Champion D C. 2007. Review: Secular tectonic evolution of Archean continental crust: Interplay between horizontal and vertical processes in the formation of the Pilbara Craton, Australia. Terra Nova, 19: 1–38

Wan B, Yang X, Tian X, Yuan H, Kirscher U, Mitchell R N. 2020. Seismological evidence for the earliest global subduction network at 2 Ga ago. Sci Adv, 6: eabc5491

Wilde S A, Valley J W, Peck W H, Graham C M. 2001. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. Nature, 409: 175–178

Witt W K, Cassidy K F, Lu Y J, Hagemann S G. 2020. The tectonic setting and evolution of the 2.7 Ga Kalgoorlie-Kurnalpi Rift, a world-class Archean gold province. Miner Depos, 55: 601–631

Wyman D A. 2019. 2.8 Ga Subduction-related magmatism in the Youanmi Terrane and a revised geodynamic model for the Yilgarn Craton. Precambrian Res, 327: 14–33

Yuan H. 2015. Secular change in Archaean crust formation recorded in Western Australia. Nat Geosci, 8: 808–813

Yuan H, Dueker K. 2005. Upper mantle tomographic V_P and V_S images of the Rocky Mountains in Wyoming, Colorado and New Mexico: Evidence for thick, laterally heterogeneous lithosphere. In: Randy G, Karlstrom K E, eds. The Rocky Mountain Region—An Evolving Lithosphere: Tectonics, Geochemistry, and Geophysics. Geophysical Monograph 154: Washington, DC, American Geophysical Union. 329–345

Yuan H, Dueker K G. 2010. Relict Slab and Young plume: Seismic view of the present time Wyoming Lithosphere. Earth Sci Front, 17: 127–138

Yuan H, Bodin T. 2018. A probabilistic shear wave velocity model of the crust in the central west Australian craton constrained by transdimensional inversion of ambient noise dispersion. Tectonics, 37: 1994–2012

Yuan H, Dueker K, Stachnik J. 2010. Crustal structure and thickness along the Yellowstone hot spot track: Evidence for lower crustal outflow from beneath the eastern Snake River Plain. Geochem Geophys Geosyst, 11: 2009GC002787

Zandt G, Ammon C J. 1995. Continental crust composition constrained by measurements of crustal Poisson's ratio. Nature, 374: 152–154

Zegers T E, van Keken P E. 2001. Middle Archean continent formation by crustal delamination. Geology, 29: 1083

Zhao D, Hasegawa A, Horiuchi S. 1992. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan. J Geophys Res, 97: 19909–19928

Zhao L, Paul A, Guillot S, Solarino S, Malusà M G, Zheng T, Aubert C, Salimbeni S, Dumont T, Schwartz S, Zhu R, Wang Q. 2015. First seismic evidence for continental subduction beneath the Western Alps. Geology, 43: 815–818

Zhao L, Tyler I M, Gorczyk W, Murdie R E, Gessner K, Lu Y, Smithies H, Li T, Yang J, Zhan A, Wan B, Sun B, Yuan H. 2022. Seismic evidence of two cryptic sutures in Northwestern Australia: Implications for the style of subduction during the Paleoproterozoic assembly of Columbia. Earth Planet Sci Lett, 579: 117342

Zhu L, Kanamori H. 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions. J Geophys Res, 105: 2969–2980

Zurek B, Dueker K. 2005. Lithospheric layering beneath the southern Rocky Mountains from the CD-ROM experiment. In: Randy G, Karlstrom K E, eds. The Rocky Mountain Region—An Evolving Lithosphere: Tectonics, Geochemistry, and Geophysics. Geophysical Monograph 154: Washington, DC, American Geophysical Union. 317–328

(责任编委: 高尚行)