克拉通岩石圈电性结构研究进展

胡祥云^{1*}, 林武乐¹, 杨文采², 杨博¹

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 地球内部多尺度成像湖北省重点实验室, 武汉 430074;

2. 浙江大学地球科学学院, 杭州 310058

* 通讯作者, E-mail: xyhu@cug.edu.cn

收稿日期: 2019-06-27; 收修改稿日期: 2020-05-26; 接受日期: 2020-06-29; 网络版发表日期: 2020-09-27

国家自然科学基金项目(批准号: 41630317、41474055)和国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC0602405)资助

摘要 克拉通保存着大陆地壳复杂的生长和演化历史, 是国内外研究壳幔结构及其演化过程的焦点地区. 文章着眼于国内外学者近30年在北美、南美、亚洲、澳洲、非洲等多地的克拉通取得的大地电磁测深工作成果, 总结发现: 太古宙克拉通核部通常存在着巨厚的高阻岩石圈根, 如Kalahari克拉通、Rae克拉通等. 克拉通形成过程中或形成之后诸如碰撞拼合、地幔热柱、软流圈物质上涌等的活动, 使得颗粒边界石墨膜或硫化物等形成, 名义上无水矿物中氢含量增加, 铁含量增加等, 从而在克拉通岩石圈中形成高导区域. 这些高导区的存在使得克拉通岩石圈在电性结构上出现电阻率的不连续现象, 具体包括: (1) 诸如Slave克拉通、Gawler克拉通、华北克拉通中部造山带等下方大范围范围的岩石圈地幔高导体; (2) 诸如Dharwar克拉通、Slave克拉通等的下方与古缝合带有关的近垂向高导体; (3) 诸如Kaapvaal克拉通Bushveld杂岩地下的横向不连续的高导体. 电莫霍面是壳幔边界的电阻率不连续. 现有的研究实例中, 电性莫霍面在岩石圈电阻率极高仅下地壳有轻微降低的情况下, 高导下地壳层缺失或极薄的情况下被观测到. 中国华北克拉通独特的下地壳-岩石圈地幔“蘑菇状”高导体以及存在极薄的下地壳层的电性结构可能代表了克拉通的破坏或改造. 同时, 我们也发现, 部分克拉通仍存在研究不够充分的问题. 广泛的三维电性结构研究和多种数据的联合解释是理解克拉通的构造演化历史的发展趋势.

关键词 克拉通, 岩石圈电性结构, 大地电磁法

1 引言

经典大地构造学将大陆分为克拉通、造山带和裂陷区三部分, 其中克拉通指大陆地壳中含有陆核的古老且稳定的部分(杨文采和于常青, 2014). 克拉通拥有较厚的岩石圈, 包含大约50km厚的地壳和大约150km厚的岩石圈地幔(Artemieva和Mooney, 2001), 并且缺少近期的地震和火山活动, 地温梯度低、密度

低、黏度高. 因此克拉通往往能够保存大陆地区复杂的生长和演化历史, 成为国内外研究岩石圈结构及其演化的焦点地区. 目前已经识别出的独立的太古宙克拉通核大约有35个(图1), 这些克拉通的生长过程主要发生在新太古代(2.7~2.5Ga), 基本上在新太古代末期或元古代早期克拉通化(Bleeker, 2003). 现有的关于克拉通形成模式有两种主流观点: 一种观点认为克拉通形成于岛弧的横向增生和俯冲大洋岩石圈的底垫,

中文引用格式: 胡祥云, 林武乐, 杨文采, 杨博. 2020. 克拉通岩石圈电性结构研究进展. 中国科学: 地球科学, 50(11): 1533–1552, doi: 10.1360/SSTe-2019-0141
英文引用格式: Hu X, Lin W, Yang W, Yang B. 2020. A review on developments in the electrical structure of craton lithosphere. Science China Earth Sciences, 63(11): 1661–1677, <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9653-2>

图1 全球克拉通分布

黑色粗体字代表了本文中提及的克拉通, 包括北美Rae克拉通、Slave克拉通, 南美Rio de la Plata克拉通、São Francisco 克拉通, 南非Kalahari 克拉通(包含Zimbabwe克拉通与Kaapvaal克拉通), 澳大利亚Gawler克拉通, 印度Dharwar克拉通、Singhbhum克拉通, 中国华北克拉通。修改自Tang Y J等(2013), 已获得Elsevier使用许可

与现今的板块构造运动无异; 另一种观点则认为其形成于原始大陆的分异、微陆块的横向增生和持续的地幔柱底侵过程(Lee等, 2011; Snyder等, 2015)。克拉通形成之后往往能保持稳定, 并与周缘地块发生拼合从而形成更大的构造单元, 其地壳或岩石圈内部基本不会发生构造变形。但对华北克拉通的研究使得克拉通的破坏这一课题成为大家探讨的热点, 关于华北克拉通破坏的时空分布和动力学机制仍是争论的焦点(朱日祥等, 2012)。另外, 一些克拉通地区也是重要的金刚石的产区, 使得岩石圈深部结构的研究也具有了经济效益。

地球物理方法被广泛应用于地球深部结构的探测, 它通过对物理场的观测、处理和反演来获取地球内部结构的物理模型, 包括地震波速度结构模型、电性结构模型、位场结构模型以及地热结构模型等(杨文采, 2014)。其中的电性结构模型能够用于推断地球内部的岩、矿物组成和地质构造轮廓, 还可以间接提

供地球内部热结构及流变学强度等的信息, 为研究地球内部物质状态、地壳运动过程及其动力学机制等科学问题服务(魏文博等, 2010; Chave和Jones, 2012; Liu和Hasterok, 2016)。

大地电磁测深法(Magnetotellurics)是研究岩石圈电性结构(表征参数为电导率或电阻率, 二者互为倒数)的首要方法。它通过在地表测量随时间变化的天然电磁场来获取地下介质的电导率结构(Tikhonov, 1950; Cagniard, 1953), 其探测深度取决于观测周期和介质的电导率: 周期越长, 电导率越低, 探测深度越大(Simpson和Bahr, 2005)。随着大地电磁仪器、计算机等硬件设备及数据处理、反演算法的进步, 岩石圈电性结构的研究趋于精细, 大地电磁方法也已广泛应用于克拉通结构的研究。近年来越来越多的岩石矿物实验为大地电磁结果与地质特征之间搭建了更好的桥梁, 使得电性结构能够更好的反映岩石圈组成、结构和构造演化信息。在这里, 我们广泛收集了近30年来克拉通地

区大地电磁的研究成果(见网络版附表1, <http://earthcn.scichina.com>), 涵盖了欧亚、澳洲、北美、南美、非洲等大陆的多个地区(本文提及的克拉通在图1中用黑色粗体标出). 我们通过对现有研究成果的整理, 从典型的电性结构特征出发, 以实例分析的方法, 阐述了克拉通岩石圈电性结构特征研究取得的进展, 进而提出了未来工作的发展方向.

2 原始的克拉通核(nucleus): 巨厚高阻的岩石圈根

稳定的克拉通核部的一个典型特征是拥有巨厚的岩石圈根(lithospheric root), 岩石圈厚度可以深达200km以上. 大地电磁调查结果发现这些稳定地块的巨厚的岩石圈根整体表现为高阻的特性. 这其中最有代表性的是南非Kalahari克拉通(图2). Kalahari克拉通由北部的Zimbabwe克拉通、南部的Kaapvaal克拉通以及中部的Limpopo构造带组成. Zimbabwe克拉通形成于3.5~2.6Ga(Kusky, 1998), Kaapvaal克拉通形成于3.7~2.6Ga(de Wit等, 1992), 两者于2.7~2.6Ga发生碰撞拼合(van Reenen等, 1987)共同组成了南非大陆的核部. 2003~2008年在非洲南部地区开展的大范围大地电磁实验(SAMTEX), 其所采集的测点覆盖了整个Kaapvaal克拉通及Zimbabwe克拉通的西段(Jones等, 2009)(如图2). 此次大地电磁调查发现, Kaapvaal克拉通主体的电性结构呈现为约20km的高阻上地壳, 约20~40km相对低电阻率的中下地壳以及高阻的岩石圈地幔(Evans等, 2011). 上地壳和岩石圈地幔都表现为大于100000 Ω m的高电阻率特征(图2c), 中下地壳和岩石圈地幔以下的电阻率减小, 是典型的稳定太古宙克拉通的电性结构特征. 研究表明, 该克拉通岩石圈厚度大约190~230km, 内部不同块体之间也表现为不同的岩石圈厚度: 东Kimberley地块岩石圈厚度大, 约220km, 电阻率高; 西Kimberley地块(Kheis褶皱带)岩石圈相对较薄, 约190km, 电阻率也相对较低, 两者间岩石圈厚度的差异也得到了地震层析成像结果的支持(Muller等, 2009). 高阻的岩石圈根在地震波成像中显示为高波速异常(Fouch等, 2004), 橄榄石中石榴子石包体样品的地球化学分析表明Kaapvaal克拉通巨厚的岩石圈根源于地幔熔融过程发生了地球化学成分的高程度亏损(Banas等, 2009). Zimbabwe克拉通(图2b)岩石

圈厚度约220km, 在深度约150km处, 电阻率值大约30000 Ω m, 也表现为巨厚的高电阻特征(Miensopust等, 2011).

拥有巨厚的高电阻率岩石圈地幔的另一个代表是北美Rae克拉通(图3). Rae克拉通位于加拿大地盾的中部, 包含中太古代-新太古代的深成变质片麻岩和古元古代早期(2.5~2.3Ga)Arrowsmith造山运动形成的薄的上地壳变形带, 后期经历了2.19~1.75Ga的沉积岩和火山岩的覆盖, 1.83~1.78Ga的深成侵入, 并受到Trans-Hudson造山运动(1.9~1.8Ga)早期增生和晚期阶段的改造(Berman等, 2005; 2013). 在Rae克拉通开展的大地电磁研究工作如图3所示. 研究结果发现, Rae克拉通岩石圈地幔纵向上呈现为延伸到200~300km的高电阻率特性(Spratt等, 2014). 并且, 岩石圈电阻率在横向上显示从北东到南西方向的普遍增加: 最北端Baffin岛中部(Evans等, 2005)和Melville半岛(Spratt等, 2013)岩石圈地幔电阻率值大于30000 Ω m, 克拉通中部(剖面2北段, 图3b)电阻率增加到大约100000 Ω m(Spratt等, 2014), 而在Rae克拉通最南端(剖面2南段, 图3b)岩石圈地幔电阻率值超过500000 Ω m(Jones等, 2002; Spratt等, 2014). Spratt等(2014)认为此处岩石圈地幔横向上电阻率的变化可能来自于地幔温度小于100℃的增加, 或者是相对干燥的地幔(水含量大约100ppm, 1ppm=1 μ g/g)水含量的增加.

同样, 巨厚的高阻岩石圈根也在南美Rio de la Plata(Bologna等, 2019)、São Francisco(Rocha等, 2019)、印度Dharwar(Malleswari等, 2019)和澳大利亚Gawler(Thiel和Heinson, 2013)等克拉通被观测到. 这在一定程度上反映了稳定的克拉通地块温度低, 含水量低, 岩石圈地幔亏损程度高的特性.

3 克拉通岩石圈中的电性不连续

高阻的克拉通岩石圈结构吻合了岩石圈标准组分模型得到的实验电阻率模型(如Kariya和Shankland, 1983; Fulla等, 2011). 然而, 众多大地电磁研究结果发现克拉通岩石圈中往往存在着一些由高导区导致的电性不连续现象. 结合Selway(2019)的分类方式, 我们将这些电性不连续分为四个部分进行实例阐述: (1) 大范围的岩石圈地幔高导体; (2) 与古缝合带有关的电性不连续; (3) 横向的电性不连续; (4) 壳幔电性不连续.

图2 南非Kalahari克拉通(含Zimbabwe克拉通与Kaapvaal克拉通)及周缘地质构造概况及大地电磁测点剖面分布图(a)、ZIM剖面(b)和A-B剖面(c)电性结构模型

(a)修改自Jones等(2013), 已获得John Wiley and Sons使用许可。大地电磁剖面KIM-NAM据Muller等(2009), 剖面KAP自Khoza等(2013)。 (b)修改自Miensoopust等(2011), 已获得John Wiley and Sons使用许可。莫霍面位置据Youssof等(2013)。 (c)修改自Evans等(2011), 已获得John Wiley and Sons使用许可。莫霍面位置据Youssof等(2013)

3.1 大范围的岩石圈地幔高导体

现有的大地电磁研究成果表明, 一些稳定的克拉通块体局部岩石圈地幔中会出现大范围的高导体。这些高导体在横向上的延伸从几十到几千公里不等, 往往对应了克拉通在形成过程中或形成之后受到的构造热事件的影响。由于不同克拉通之间构造演化的差异,

诸如名义上无水矿物中的氢, 颗粒边界薄的石墨膜或高度互联的硫化物, 矿物颗粒的减少, 铁的存在等, 都曾被用来解释这些高导体的成因(Selway, 2014)。

提及岩石圈地幔高导体, 我们首先要谈的便是北美Slave克拉通(图4)。Slave克拉通位于加拿大地盾的西北方, 是世界上最小的太古宙克拉通单元, 克拉通主体形成于2.55Ga, 拥有现今世界上已知的最古老的

图3 南美Rae克拉通及周缘地质构造概况及大地电磁测点剖面分布图(a)和Profile 2电性结构模型(b)

修改自Spratt等(2014), 已获得John Wiley and Sons使用许可. 大地电磁剖面Profile 1、2、2d、3据Spratt等(2014), 剖面Profile 4据Spratt等(2013), 剖面Profile 5据Jones等(2002)

岩石——大约4.03Ga的Acasta片麻岩(Stern和Bleeker, 1998). Slave克拉通基底在形成后经历了多期次太古宙构造热事件, 元古宙岩墙群侵入以及近500Ma以来的金伯利岩岩浆作用(Davis等, 2003). 为了研究Slave克拉通的深部结构, 众多地球物理工作曾在该地区开展, 包含了地震反射剖面(Cook等, 1999)、折射剖面(Viejo和Clowes, 2003)、远震资料成像(Bank等, 2000)以及多次大地电磁实验等. 现有的覆盖Slave克拉通及周围地区的138个大地电磁测点(图4a), 包含了1996年加拿大“岩石圈探针”SNOCLE计划中的测点(图4a中圆形表示), 1998~1999年Winter Road实验中的测点(图4a中方形表示), 1998年Lake Bottom实验的测点(图4a中星

形表示), 2000年Targeted Geoscience Initiative调查中的使用的直升机平台测点(图4a中倒三角形表示)以及穿越克拉通西缘的Slave-Bear剖面(图4a中深蓝色直线表示)等. 大地电磁研究发现在Slave克拉通中部的岩石圈地幔存在低电阻率异常区(图4d), 称为Slave中央地幔导体(Central Slave Mantle Conductor). 这个高导体的电阻率值大约10~15Ω m, 向北西方向倾斜, 高导体的顶界面深度自北侧的80km向南逐渐增加至120km, 厚度大约20~30km, 呈北东-南西走向(Jones等, 2003). 高导体下方电阻率值增大到大约50Ω m. Slave中央地幔高导体在空间上与克拉通中部超亏损方辉橄岩层以及始新世金伯利岩岩浆作用的范围一致. Jones等

图4 南美Slave克拉通及周缘地质构造及大地电磁测点剖面分布图(a)、S2B剖面(b)和B剖面(c)电性结构模型以及Slave克拉通西南边缘106台站一维电性结构模型(d)

(a)和(c)修改自Jones等(2003), 已获得Elsevier使用许可; (b)修改自Spratt等(2009), 已获得John Wiley and Sons使用许可; (d)据Jones和Ferguson(2001), 实线代表最匹配层状地球模型, 虚线代表最匹配连续模型, 点线代表在35.5km处有不连续的最匹配连续模型

(2001, 2003)将其解释为颗粒边界的薄的石墨膜的存在。他推断电导率的增加可能与方辉橄榄岩层有关, 发生于太古宙2.63Ga的俯冲板片在克拉通岩石圈底部的叠瓦状堆积形成的石墨膜, 从而产生高导异常。Selway(2014)则认为亏损氢和碳的方辉橄榄岩层不能与高导体相对应, 并且形成于早太古宙的石墨膜也不能

在经历多期次热事件后仍保持稳定。Selway(2014)推断岩石圈地幔中电导率的增加与金伯利岩的侵位有关, 高导的石墨膜形成于早期俯冲过程中储存在岩石圈下层或软流圈上层的碳在后期大约55Ma金伯利岩侵位过程中再活化, 含碳的金伯利岩在大约80~100km深度释放的碳沿颗粒边界移动形成石墨膜。

图5 澳大利亚Gawler克拉通地质构造及大地电磁测点剖面分布图(a)、Gawler克拉通位置示意图(b)以及三维电性结构模型19、38、75、154km深度切片图((c)-(f))

(a)修改自Selway(2014), 五角星所示测点据Selway等(2011), 圆形所示测点据Maier等(2007), 三角形所示测点据Thiel和Heinson(2010), 正方形所示测点据Thiel(2008), 大地电磁剖面自Heinson等(2006). (b)据Thiel(2008). (c)-(f)据Thiel和Heinson(2013), 已获得John Wiley and Sons使用许可. 三角形代表了大地电磁台站, 星形代表主要的铁-铜-金矿床, C1、C2、C3代表高导体, R1、R2代表高阻体

同样的地幔高导异常也存在于Gawler克拉通(图5). Gawler克拉通位于澳大利亚南部, 面积约 $5.3 \times 10^5 \text{ km}^2$, 为太古宙-元古宙克拉通(Betts等, 2002).

该克拉通最古老的太古宙核由Sleaford和Mulgathing杂岩组成, 在大约2.47~2.43Ga的Sleafordian造山运动中发生变形和榴辉岩相变质(Tomkins和Mavrogenes,

2002; Swain等, 2005). 随后, 在大约400Ma的无构造活动的时期后, Gawler克拉通又经历了元古宙2.0~1.5Ga的大规模构造事件而演变成现今我们所看到的形态(Hand等, 2007): 1.85Ga和1.73~1.70Ga的造山运动使得克拉通发育了一系列大规模裂谷盆地; 大约1.62Ga的岩浆侵入形成St Peter Suite(Swain等, 2008); 大约1.59Ga大规模岩浆活动形成了总面积超过 10^5km^2 的Gawler Range Volcanics和Hiltaba Suite大火成岩省(Agangi等, 2011; Pankhurst等, 2011), 并形成了世界著名的Olympic Dam铜-金-铀-稀土矿床(Budd和Skirrow, 2007). 自2000年至今, 在Gawler克拉通进行的大地电磁研究主要包括: Heinson等(2006)在Olympic Dam矿区进行的研究(图5a中红线表示), Maier等(2007)在Gawler Range Volcanics地区进行的研究(图5a中圆圈表示), Thiel(2008)在克拉通西北部进行的研究(图5a中方形表示), Thiel和Heinson(2010)在克拉通西缘进行的研究(图5a中三角形表示), Selway等(2011)在克拉通南缘进行的研究(图5a中星形表示)以及后续的一些利用

以上测点数据资料进行的研究(Thiel和Heinson, 2013; Selway, 2014; Wang等, 2014)等. 大地电磁研究表明, Gawler克拉通中部大于80km的深度的岩石圈地幔表现为电阻率小于 $100\Omega\cdot\text{m}$ 高导特征. 高导体中心电阻率小于 $10\Omega\cdot\text{m}$, 向下一直延伸到大于150km的深度(图5e~5f中C1). 高导异常区分布范围对应了地表Hiltaba Suite侵入体, Gawler Range Volcanics侵入体的西北部以及St Peter Suite的北缘. Maier等(2007)认为此处岩石圈电导率的增加是名义上无水矿物中氢含量的增加与颗粒边界石墨膜的存在共同引起的结果, 1.59Ga GRV和Hiltaba Suite大火成岩省形成后没有大规模热构造事件的发生使得石墨膜可以长期稳定存在. Thiel和Heinson(2013)结合地震面波低速(Fishwick和Rawlinson, 2012)和长波长重力正异常的(Bacchin等, 2008)资料, 认为这里可能发生了地幔组成成分的改变. 他们推断一部分电导率的增加可能来自于颗粒边界的硫化铁, 由于Gawler Range Volcanics和Hiltaba Suite处于大陆弧后构造环境, 岩石圈底部部分熔融程度低, 地幔柱的存在为氢和铁

图6 华北克拉通及周缘地质构造及大地电磁测点剖面分布图

大地电磁剖面及测点: (1) 东乌珠沁旗-东沟剖面, 据卢造勋等(1993); (2) 红格尔-丹东剖面, 据Dong等(2015)和董泽义等(2016); (3) 红格尔-怀来剖面, 据梁宏达等(2015); (4) 江苏响水-内蒙满都拉剖面, 据江钊等(1990), 红色线表示; (5) 华北中部造山带北段5条剖面, 据赵国泽等(1996, 1997, 1998)和Zhang等(2016); (6) 恒山-五台山-阜平剖面, 据Yin等(2016); (7) 靖边-保定剖面, 据赵国泽等(2010), 紫色线表示, 该剖面为玛沁-兰州-靖边剖面的北东向延伸; (8) 山西应县-山东商河剖面, 据魏文博等(2006, 2008); (9) 陕西榆林-山西文水-山东日照剖面, 据魏文博等(2008); (10) 山东平邑-江苏滨海剖面, 据肖骑彬等(2008); (11) $1^\circ \times 1^\circ$ 大地电磁标准网中心点, 据Ouro-Djobo Sedikou等(2018), 圆点表示, 其中蓝色代表文献Dong等(2014)使用的测点, AA'、BB'表示两条电阻率切面位置, CC'表示许林斌等(2017)使用的绥德-西河乡剖面; DD'及四条南北向短剖面表示Yin等(2017b)使用的剖面. (12) 乌拉特中旗-宝鸡剖面, 据李晨晶等(2017); (13) 查甘池-银川-五湖洞剖面, 据王鑫等(2010); (14) 盐池-阿拉善剖面, 据屈健鹏(1998); (15) 定边-景泰剖面, 据屈健鹏(1998); (16) 玛沁-兰州-靖边剖面, 据赵国泽等(2004)和汤吉等(2005); (17) 陇西-黄陵剖面, 据韩松等(2016)

在岩石圈地幔和地壳的富集提供了可能。

另外一个实例是华北克拉通的华北中部造山带(图6)。它是东、西地块的碰撞带,其地表地形、重力异常及岩石圈厚度均发生了明显的变化(朱日祥等, 2011)。Yin等(2017a)在吕梁杂岩体的大地电磁研究发现,杂岩体南部(36°N~38°N)下方大约80~180km深度处存在东倾的电阻率大约10~100Ω m岩石圈地幔高导体,高导体从西部地块向东延伸到华北中部造山带下方(图7d)。向东倾斜的上地幔高导体可能代表了残留

的古大洋俯冲板块,且由南向北俯冲角度增大。Yin等(2017a)推断,此处电导率的增加可能来自于俯冲过程中局部剪切应力使得橄榄石颗粒减小以及俯冲通过流体交代作用形成颗粒边界高度互联的高导电矿物。然而,吕梁杂岩体北部(39°N)则缺少与俯冲相关的电性结构(图7d)。Yin等(2017a)认为地下存在的地壳上地幔高导体代表了软流圈物质的上涌。他们推断这个位置可能为古大洋中脊的俯冲或者发生了俯冲板片的断离。

图7 华北克拉通及周缘地质构造图(a)、鄂尔多斯地块及周缘三维电性结构模型10、35、60、90、120、150km深度切片及BB'切面图(b)、山西应县-山东商河、山西文水-山东日照剖面电性结构模型(c)以及华北中央造山带吕梁杂岩体地下电性结构模型(d)

(b)修改自Dong等(2014), 已获得John Wiley and Sons使用许可; (c)修改自魏文博等(2008); (d)修改自Yin等(2017a), 已获得Elsevier使用许可; FSZ代表古俯冲带, UMCC代表上地幔高导体

3.2 与古缝合带有关的电性不连续

克拉通内部近垂向的窄的高导不连续往往反映出了不同块体之间拼合形成的古缝合带。这里我们以Dharwar克拉通为例,它是印度地盾最大的克拉通单元,面积大约 $4 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。Dharwar克拉通出露了大量年龄大于3.0Ga的古老的基底岩石,记载了地球丰富的演化历史(图8)(Naqvi, 2005)。克拉通自北向南,变质等级自绿片岩相到角闪岩相逐渐升高。在新太古代东西向挤压作用的影响下形成了一系列南北-北北西向平移剪切变形(构造走向)(Chardon等, 2008)。大地电磁结果表明在Dharwar克拉通中部Chitradurga片岩带位置地下存在岩石圈尺度的近垂向低阻带(图9c中C8),而低阻带两侧都为高阻的克拉通岩石圈(Malleswari等, 2019)。大量研究认为Chitradurga片岩带的东边界为Dharwar东、西地块的分界线。因而该近垂向低阻带也被认为是不同岩石圈地块之间的古缝合带的电性反映(Gokarn等, 2004; Kusham等, 2018a, 2019; Malleswari等, 2019)。同样的近垂向低阻带在西Dharwar克拉通与Coorg地块接触位置的地下也有发现(图9b中

MC1)。近期的地球年代学和同位素证据表明,Coorg地块并不是Dharwar克拉通的一部分,而是作为一个外来的地体在元古代大约2.5~2.2Ga碰撞增生到Dharwar克拉通的西南部,二者之间以Coorg缝合带为界(Santosh等, 2015)。由于印度半岛自冈瓦纳大陆裂解以来的白垩纪-三叠纪岩石圈受到了多个地幔柱作用的影响,Abdul Azeez等(2015)和Malleswari等(2019)认为构造热事件使得相对软弱的古缝合带位置发生周期性再活化,来自于地幔的富含二氧化碳的流体或动力学过程造成的颗粒尺寸的减小或者二者的共同作用使得电导率增加。不仅如此,古缝合带的存在使得与缝合带接触的两侧地块岩石圈底部也更容易受到热事件的影响,在西Dharwar克拉通表现为岩石圈地幔高导体的存在(图9c中C9, 图9b中MC2)。Abdul Azeez等(2015)认为元古宙Coorg地块与Dharwar克拉通的碰撞在西Dharwar克拉通岩石圈地幔产生软弱区,后期的众多热构造事件使其周期性再活化,而这个高导体可能是无水矿物中的氢,颗粒间石墨膜或硫化物,氧化铁共同作用的结果,他认为地幔热柱在Dharwar克拉通西缘的活动

图8 印度Dharwar克拉通地质构造及大地电磁剖面分布图(a)和Dharwar克拉通位置示意图(b)

(a)修改自Malleswari等(2019), 已获得Elsevier使用许可。大地电磁剖面: 01自Kusham等(2019), 02自Gokarn等(2004), 03自Kusham等(2018a), 04自Naganjaneyulu和Santosh(2012), 05自Malleswari等(2019), 06自Kusham等(2018b), 07自Abdul Azeez等(2015)。 (b)修改自Abdul Azeez等(2015), 已获得John Wiley and Sons使用许可

图9 印度Dharwar克拉通地质构造及大地电磁剖面分布图(a)和Dharwar克拉通电性结构模型(b)和(c)

(a)和(c)修改自Malleswari等(2019), 已获得Elsevier使用许可; (b)修改自Abdul Azeez等(2015), 已获得John Wiley and Sons使用许可

使得富含碳、硫和铁的软流圈流体注入上覆岩石圈, 从而使得岩石圈地幔发生了再富集而呈现高导的性质。

类似的横向不连续也存在于一些克拉通的边界。如Slave克拉通西缘与Wopway造山带接触位置(如图4b)。近垂向的地壳-岩石圈地幔的相对高导体反映了不同地块的缝合, 将两个地块区别开来。Spratt等(2009)认为局部剪切作用造成的矿物颗粒的减小是该高导体的形成原因。

3.3 横向的电性不连续

在一些克拉通的岩石圈中存在局部的高导体, 这些高导体使得整个克拉通的电性结构在横向上表现为

不连续。最典型的代表就是Kaapvaal克拉通Bushveld杂岩体位置。相较于克拉通的其他位置, 该杂岩体下方地壳及岩石圈地幔都表现为明显的高电导率特性(图2c)(Evans等, 2011; Khoza等, 2013)。Bushveld杂岩体形成于2.05Ga的岩浆活动, 是现今地球上最大规模的层状侵入体。Evans等(2011)认为地幔的高导异常的形成可能早于Bushveld岩浆事件, 后期的岩浆活动沿岩石圈软弱带侵位, Bushveld杂岩体靠近Kaapvaal克拉通与Zimbabwe克拉通的碰撞缝合带, 在俯冲过程中形成了富含高导石榴子石的地幔榴辉岩; 或者是岩浆事件直接导致了高导异常的形成, 岩浆侵入带来的硫化物使得电导增加; 又或是岩浆活动与早期构造共同控制了

高导异常的形成, 硫化物使得石榴子石组成高度连通的网格从而增加电导率. 地壳高导体则可能形成于金属和重金属的矿化(Evans等, 2011).

3.4 壳幔电性不连续——电莫霍面的存在与否

地壳-地幔的分界面一直是岩石圈研究的焦点. 壳幔边界在岩石学中被认为是富硅的长英质和铁镁质地壳岩石与超铁镁质地幔橄榄岩的分界面. 而在地球物理学中, 地壳-地幔的分界面(莫霍面)最早被定义为地震波速度的间断面, 后来基于不同的地球物理探测方法衍生了诸如反射莫霍面、折射莫霍面、电性莫霍面、重力莫霍面等. 其中, 电性莫霍面在本文定义为岩石学中的壳幔边界的电性反映. 电性莫霍面自Jones和Ferguson(2001)在Slave克拉通发现以来, 关于它的存在性一直受到争议.

Jones(2013)根据岩石实验结果给出了如表1所示的太古宙地区的通用电性结构模型以检测大地电磁方法对电性莫霍面的分辨能力. 研究表明, 对于给定的模型, 大地电磁方法对莫霍面深度变化敏感的频率范围为1~100s, 并且随着数据噪声的增加, 能分辨出来的特征参数会减少, 最先不能被分辨的是下地壳的厚度(Jones, 2013). 类似的电性结构模型如北美的Rae克拉通(图3b中dmn207、dmn208台站), 岩石圈整体表现为电阻率大于50000 Ω m的高阻块状结构, 只有在地壳底部42~45km位置出现了电阻率的轻微降低, 电阻率值大约10000 Ω m, Spratt等(2014)认为这可能反映了电性莫霍面的存在.

在实际研究中, 很多克拉通地区并没有达到模型中给出的那么高的电阻率. 特别是下地壳由于石墨膜、硫化物等导电物质的存在常表现为高导的性质, 高导的下地壳会对电磁信号产生一定的“屏蔽”作用, 使得地壳和地幔的分界面变得不能识别, 从而限制了大地电磁法对电性莫霍面的研究(Jones, 1999). 华北克拉通的大地电磁研究发现, 当下地壳高导层非常薄时, 电性莫霍面能够被分辨出来. 克拉通下方极薄的高导层形成了电性梯度带, 其深度与人工地震探测刻画的莫霍面的起伏大致相符, 反映了电性莫霍面的存在(魏文博等, 2008).

相反, 有些克拉通, 如Slave克拉通、Singhbhum克拉通, 其下地壳的电阻率大于岩石圈地幔. Jones和Fer-

表1 太古宙地区通用电性结构模型^{a)}

名称	厚度(km)	电阻率(Ω m)
上地壳	20	40000
下地壳	20	10000
岩石圈地幔	40/70/75	50000/5000/500
软流圈	—	10

a) 据Jones(2013)

guson(2001)利用Slave克拉通西南缘的site 106台站的大地电磁数据进行一维反演发现, Slave克拉通的地壳从5km到大约35km的电阻率为大于40000 Ω m的高阻, 岩石圈地幔的电阻率为大约4000 Ω m的中等电阻率. 在大约35.5km深度处, 电阻率有大于一个数量级的改变(图4d). 此深度吻合了地震反射(Cook等, 1999)、折射(Viejo和Clowes, 2003)及远震资料成像(Bostock, 1998)探测得到的莫霍面深度. 因而, Jones和Ferguson(2001)认为大约35.5km处电阻率的变化反映了电性莫霍面的存在. 紧随其后, Bhattacharya和Shalivahan(2002)在印度东部的Singhbhum克拉通发现了电性莫霍面的存在. Singhbhum克拉通拥有约38km厚的电阻率大约30000 Ω m的高阻花岗岩地壳层, 约8km厚的电阻率大约8500 Ω m的相对低阻下地壳层及电阻率大约750 Ω m的次低阻岩石圈地幔(图10b). Bhattacharya和Shalivahan(2002)认为下地壳底部大约46km处电阻率大约一个数量级的降低为电性莫霍面的反映. 这两个实例中电性莫霍面的存在归因于高导下地壳的缺失, 但也存在一个问题, 此时对电性莫霍面深度敏感的周期是0.1~10s, 对应了大地电磁中的“死频带”, 可能需要更长时间或更多次的野外观测以获得高质量数据(Jones, 2013).

实验研究认为, 如果地壳和上地幔是干燥的且不含任何导电相, 那么从下地壳镁铁质岩石向上地幔超铁镁质岩石转换中应该存在电阻率的增加(Jones, 2013). 然而, 温度、组分和氧逸度等对下地壳和地幔岩石的影响, 使得电阻率的变化与岩石类型的变化不对应(Wang等, 2013). 另外, 最早利用地震学方法定义的莫霍面是一个全球性存在的速度间断面. 电阻率相对于速度, 更易受到组分的影响, 以地幔岩石为例, 细微的氢含量的增大, 就会使得其橄榄石(Wang等, 2006; Yoshino等, 2009)、辉石(Yang, 2011)、石榴子石(Yoshino等, 2008)等地幔矿物的电阻率很大程度的降

低。又如, 软流圈物质的上涌使得中下地壳-上地幔中硫化物积累, 使电导率整体升高, 导致地震波速度不同的地壳地幔层表现为同一电阻率值(Selway, 2014)。因而我们认为, 即使不考虑高导下地壳对大地电磁方法的限制, 电性莫霍面可能也并不能够被定义为一个全球性连续的界面。

4 减薄与破坏的克拉通在电性结构上的反映

现今克拉通研究的一个热点问题便是岩石圈的减薄与破坏。岩石圈的减薄指的是岩石圈厚度的降低, 而岩石圈的破坏则为克拉通失去稳定性的过程(吴福元等, 2014)。这其中最为典型的便是华北克拉通(图6)。华北克拉通位于中国东部的偏北部, 面积约 $1.7 \times 10^6 \text{ km}^2$, 最古老的地壳岩石可追溯到大约4.0Ga(吴福元等, 2008), 是亚洲最古老的克拉通之一。华北克拉通在空间上可分为西部地块、东部地块及华北中部造山带三部分。西部的鄂尔多斯地块在1.8~1.9Ga沿着内蒙古缝合带与阴山地块拼合到一起, 进而与东部地块碰撞(Santosh, 2010)。自中-新生代以来, 华北克拉通经历了强烈的挤压、拉伸以及强烈的断层作用、沉降作用以及广泛的岩浆活动(如汉诺坝玄武岩, 大同火山), 形成了薄的高热流值的富集岩石圈, 并且在过去的几十年经常有地震事件的发生, 成为了地震活动区(张培震等, 2003; Gao等, 2004; Xu等, 2005; 朱日祥等, 2011)。华北克拉通的破坏已得到众多资料的支持。魏文博等(2006, 2008)在华北东部布设了NW-SE向的山西应县-山东商河和山西文水-山东日照两条大地电磁剖面。研究发现, 东部地块地下横向和纵向电性梯度带的存在使其总体表现为纵向分层、横向分块的特点(图7c)。下地壳电性梯度带由不完全连续的薄的高导层和电性畸变带构成, 深度与人工地震探测刻画的莫霍面的起伏大致相符。上地幔电性梯度带存在于地幔高导体的顶界面, 是岩石圈-软流圈界面的反映(魏文博等, 2008)。魏文博等(2008)根据地壳、地幔电性主轴方向的差异推断华北地区东部地壳上地幔可能发生过大规模滑脱, 导致地壳与地幔之间形成软弱层, 从而在莫霍面深度上出现电性梯度带。

对于中部造山带和西部地块, 大地电磁研究发现其呈现出南北不同的电性结构。中部造山带北段岩石

圈很薄, 厚度大约70km, 地壳厚度约30~40km(图7c)(魏文博等, 2008)。明显的“蘑菇状”高导体存在于西部地块北段(包括鄂尔多斯地块北段及以北的内蒙古缝合带、阴山地块)和中部造山带北段(包括汉诺坝、大同火山、五台-阜平地区、吕梁杂岩体南部)下方(如图7b), 该高导体由岩石圈近垂向高导体、下地壳高导层和上地幔高导体相连组成(Dong等, 2014; Zhang等, 2016; Yin等, 2016, 2017a)。结合地震和地热资料(任战利等, 2007; Jiang等, 2013), 该地区地壳-上地幔表现为高导、高s波速的特性, 且中生代热流值增大。推测该地壳-上地幔高导体是由于导电硫化物形成的(Dong等, 2014; Zhang等, 2016; Yin等, 2016, 2017a)。华北克拉通可能受到古太平洋板块俯冲的影响, 中生代中晚期发生了上地幔物质上涌, 将硫化物带到了下地壳和岩石圈地幔, 从而形成下地壳-上地幔高导体。地幔物质的上涌引发下地壳底侵, 从而使得下地壳厚度增加(如图7b中BB'剖面), 吻合了莫霍面在鄂尔多斯地块北部及北缘河套断陷的深度增加(Wang等, 2014; Dong等, 2014)。赵国泽等(2010)的研究认为中下地壳高导体可能是含盐流体造成的, 高阻上地壳为中下地壳低阻层提供了一层不透水的“帽子”, 使得流体可以封存。Sibson(1994)指出, 含盐流体一般存在于上地壳沉积岩的空隙中或者断层破碎带, 延伸到下地壳的可能性很小。在构造活动区, 变质作用可能会释放深部的流体, 从而出现较大范围的高导异常, 但在构造稳定的克拉通地块, 含盐流体一般不作为主要的高导成因(Selway, 2019)。鄂尔多斯地块南段没有类似的蘑菇状高导体的出现, 岩石圈地幔大部分呈现高电阻率的结构特征(Dong等, 2014)。另外, 中部造山带南段的南太行山隆起、山西断隆南部和吕梁山隆起区均存在山根, 岩石圈厚度达155km, 地壳厚度大约40~60km(图7c)(魏文博等, 2008; Tang Y C等, 2013)。南北段电性结构的差异可能反映了华北克拉通在受显生宙构造作用影响下, 发生岩石圈改造的空间范围。总的来说, 大地电磁研究表明华北克拉通减薄/破坏的范围并不仅仅是以南北重力梯度带为界, 在鄂尔多斯地块以及华北中部造山带的北部也都发生了岩石圈减薄及改造现象。

当然, 华北克拉通并不是发生了岩石圈减薄/破坏的个例(吴福元等, 2014)。Kumar等(2007)利用S波接收函数估算得到的印度岩石圈厚度仅有100km, 认为整个印度大陆发生了减薄。Gokarn等(2004)和Kusham等

图 10 印度Singhbhum克拉通地质构造(a)及大地电磁剖面AB的二维(b)和一维(c)电性结构模型

(a)修改自Saha(1994), 嵌图据Abdul Azeez等(2015), 图中红色方形表示地质图范围. 大地电磁剖面AB据Bhattacharya和Shalivahan(2002). (b)和(c)修改自Shalivahan等(2014), 已获得Elsevier使用许可

(2019)在印度Dharwar克拉通的大地电磁研究均认为西部块体发生了岩石圈的减薄, 岩石圈厚度大约80~100km, 他们认为地幔柱作用改造了西部块体岩石圈底部, 在地下大约100~150km范围出现高导体. Shalivahan等(2014)通过一维电性结构模型的研究, 结合地震及地质学证据, 认为印度Singhbhum克拉通岩石圈厚度约95km, 在此深度处电阻率值表现为一个数量级的降低(图10c)(Shalivahan等, 2014). 较薄的岩石圈指示了Singhbhum克拉通在形成后发生了岩石圈的减薄, 有学者认为可能是将冈瓦纳大陆分离的地幔柱产生了印度岩石圈下半部分的熔融(Kumar等, 2007). 有学者认为, 古近纪-中新世的喜马拉雅造山运动可能导致了岩石圈根的缺失(Shalivahan等, 2014; Mandal, 2017). 造山运动使得地表隆升、地壳横向缩短、地壳增厚, 从而使得下地壳发生榴辉岩化, 密度增加(Krystopowicz和Currie, 2013). 由于Singhbhum克拉通岩石圈地幔含水(Shalivahan和Bhattacharya, 2005), 强度较弱, 重力不稳定使得岩石圈发生拆离.

5 结论与展望

克拉通是大陆地壳中含有陆核的古老且稳定的部分, 它记录了大陆地区复杂的生长和演化历史. 为了更好的理解其岩石圈结构, 推演构造动力学过程, 大地电磁工作被广泛开展于克拉通地区, 以获取地下的电阻率结构. 本文收集了近30年来国内外学者在多个克拉通地区取得的大地电磁测深工作成果, 所涉及的克拉通涵盖了北美Slave克拉通、Rae克拉通, 南美Rio de Plata克拉通、São Francisco, 亚洲Dharwar克拉通、Singhbhum克拉通、华北克拉通, 澳洲Gawler克拉通, 非洲Kalahari克拉通(包含Kaapvaal克拉通和Zimbabwe克拉通). 我们总结发现, 太古宙克拉通核部通常存在着巨厚的高阻岩石圈根, 如Kalahari克拉通、Rae克拉通等. 克拉通形成过程中或形成之后诸如碰撞拼合、地幔热柱、软流圈物质上涌等的活动, 使得颗粒边界石墨膜或硫化物等形成, 名义上无水矿物中氢和铁含量增加等, 从而在克拉通岩石圈中形成高导区域. 这些高导区可分为: (1) 诸如Slave克拉通、Gawler克拉通、华北克拉通中部造山带等下方大范围的岩石圈地幔高导体; (2) 诸如Dharwar克拉通、Slave克拉通等的下方与古缝合带有关的近垂向高导体; (3) 诸如Kaap-

vaal克拉通Bushveld杂岩地下的横向不连续的高导体. 局部高导区的存在使得克拉通岩石圈在电性结构上出现电阻率的不连续现象. 电莫霍面是壳幔边界的电阻率不连续. 在利用大地电磁法对电性莫霍面进行研究时需要极高的数据质量, 且高导下地壳的存在会对地下电性结构的探测产生一定的屏蔽作用. 现有的电性莫霍面的观测实例存在于岩石圈电阻率极高仅下地壳有轻微降低的情况下, 以及高导下地壳层缺失或极薄的情况下. 中国华北克拉通独特的下地壳-岩石圈地幔“蘑菇状”高导体以及存在极薄的下地壳层的电性结构可能代表了克拉通的破坏或改造.

我们在讨论克拉通电性结构特征时也发现部分克拉通的电性结构研究并不充分: (1) 部分克拉通研究程度尚低, 如Singhbhum克拉通现阶段仅有一条位于克拉通东北部的大地电磁剖面; (2) 部分克拉通现有的岩石圈电性结构的研究主要集中在二维剖面上, 缺少三维电性结构的研究, 如Kaapvaal 克拉通; (3) 部分克拉通内不同位置研究程度不同, 如华北克拉通, 仅在西华北克拉通鄂尔多斯地块及其周缘构建了三维电性结构模型, 而东部地块仅有二维大地电磁剖面. 克拉通的形成及演化的动力学过程的研究需要构建岩石圈三维结构模型, 而电性结构模型是其中不可缺少的重要部分. 以Gawler克拉通为例的岩石圈三维电性结构模型更能有效地反映地下电性结构的分布和高阻/低阻异常体横向、纵向的延伸(Thiel, 2008; Thiel和Heinson, 2013). 另外, 开展如Slave 克拉通(Snyder等, 2014)、Rae克拉通(Snyder等, 2015)的地震学、大地电磁、地球化学的联合三维反演, 能够更好地反映现今克拉通地下结构、物质状态等, 为推演克拉通岩石圈地球动力学机制提供更为可靠的依据.

致谢 衷心感谢编委和评审专家提出的宝贵意见和建议.

参考文献

- 董泽义, 汤吉, 陈小斌, 王立凤, 王继军, 孟补在, 白云. 2016. 华北克拉通东北边界带深部电性结构特征. 地震地质, 38: 107-120
- 韩松, 韩江涛, 刘国兴, 王海燕, 梁宏达. 2016. 青藏高原东北缘至鄂尔多斯地块壳幔电性结构及构造变形研究. 地球物理学报, 59: 4126-4138
- 江钊, 孙浩, 徐常芳, 王继军, 史书林. 1990. 江苏响水内蒙满都拉地壳上地幔电性结构初探: 地学断面研究报道之三. 地震地质, 12: 193-206

- 李晨晶, 白登海, 薛帅, 李鑫, 马晓冰, 闫永利, 孔祥儒. 2017. 鄂尔多斯地块深部岩石圈电性结构研究. *地球物理学报*, 60: 1788–1799
- 梁宏达, 高锐, 候贺晟, 李文辉, 韩江涛, 刘国兴, 韩松. 2015. 碰撞后的地壳尺度伸展记录中亚造山带南缘-华北克拉通北缘深部电性结构的揭露. *地质科学*, 50: 643–652
- 卢造勋, 夏怀宽, 赵国敏, 张国臣, 董宝中, 孟补在, 李平. 1993. 内蒙古东乌珠穆沁旗至辽宁东沟地质断面综合地球物理特征. *东北地震研究*, 9: 1–12
- Ouro-Djjobo Sedikou B, 魏文博, 叶高峰, 金胜, 景建恩, 姬磊喆, 董浩, 张乐天, 尹曜田, 谢成良. 2018. 华北大地电磁测深阵列观测实验与岩石圈电性快速成像模型. *地球物理学报*, 61: 2508–2524
- 屈健鹏. 1998. 鄂尔多斯块西缘及西南缘深部电性结构与该区地质构造的关系. *内陆地震*, 12: 312–319
- 任战利, 张盛, 高胜利, 崔军平, 肖媛媛, 肖晖. 2007. 鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义. *中国科学D辑: 地球科学*, 37: 23–32
- 汤吉, 詹艳, 赵国泽, 邓前辉, 王继军, 陈小斌, 赵俊猛, 宣飞. 2005. 青藏高原东北缘玛沁-兰州-靖边剖面地壳上地幔电性结构研究. *地球物理学报*, 48: 1205–1216
- 王鑫, 詹艳, 赵国泽, 王立凤, 王继军. 2010. 鄂尔多斯盆地西缘构造带北段深部电性结构. *地球物理学报*, 53: 595–604
- 魏文博, 金胜, 叶高峰, 邓明, 景建恩, 李艳军, 张乐天, 董浩, 张帆, 谢成良. 2010. 中国大陆岩石圈电性结构研究大陆电磁参数“标准网”实验(SinoProbe-01). *地质学报*, 84: 788–800
- 魏文博, 金胜, 叶高峰, 邓明, 景建恩. 2006. 华北地区大地电磁测深及岩石圈厚度讨论. *中国地质*, 33: 762–772
- 魏文博, 叶高峰, 金胜, 邓明, 景建恩, 彭志强, 林昕, 宋石磊, 唐宝山, 屈栓柱, 陈凯, 杨宏伟, 李国强. 2008. 华北地区东部岩石圈电性结构研究减薄的华北岩石圈特点. *地学前缘*, 15: 204–216
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 郑建平. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. *岩石学报*, 24: 1145–1174
- 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
- 肖骑彬, 赵国泽, 王继军, 詹艳, 陈小斌, 汤吉, 蔡军涛, 万战生, 王立凤, 马为. 2008. 苏鲁造山带及邻区深部电性结构研究. *中国科学D辑: 地球科学*, 38: 1258–1267
- 许林斌, 魏文博, 金胜, 叶高峰, 梁宏达, 贾常秀, 龚旭, 于洋. 2017. 鄂尔多斯地块北部至阴山造山带深部电性结构特征研究. *地球物理学报*, 60: 575–584
- 杨文采. 2014. 探测大陆岩石圈的属性、相态与物质运动: 固体地球物理学的新使命. *地质论评*, 60: 1181–1198
- 杨文采, 于常青. 2014. 从地壳上地幔构造看大陆碰撞带岩石圈的克拉通化. *地质论评*, 60: 721–740
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 阎伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. *中国科学D辑: 地球科学*, 33(增刊I): 12–20
- 赵国泽, 刘国栋, 詹艳, 江钊, 刘铁胜, 汤吉, 王继军, 李文军, 梁竞阁. 1998. 张北-尚义地震区及其邻区地壳上地幔结构. *地震地质*, 20: 155–156
- 赵国泽, 刘铁胜, 江钊, 汤吉, 徐常芳, 詹艳, 白登海, 刘国栋. 1997. 山西阳高河北容城剖面大地电磁资料的二维反演解释. *地球物理学报*, 40: 38–46
- 赵国泽, 汤吉, 刘铁胜, 詹艳, 江钊. 1996. 山西阳高河北容城剖面大地电磁资料的初步解释阻抗张量分解技术及其应用. *地震地质*, 18: 66–74
- 赵国泽, 汤吉, 詹艳, 陈小斌, 卓贤军, 王继军, 宣飞, 邓前辉, 赵俊猛. 2004. 青藏高原东北缘地壳电性结构和地块变形关系的研究. *中国科学D辑: 地球科学*, 34: 908–918
- 赵国泽, 詹艳, 王立凤, 王继军, 汤吉, 陈小斌, 肖骑彬. 2010. 鄂尔多斯断块地壳电性结构. *地震地质*, 32: 345–359
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. *中国科学: 地球科学*, 41: 583–592
- 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
- Abdul Azeez K K, Veeraswamy K, Gupta A K, Babu N, Chandrapuri S, Harinarayana T. 2015. The electrical resistivity structure of lithosphere across the Dharwar craton nucleus and Coorg block of South Indian shield: Evidence of collision and modified and preserved lithosphere. *J Geophys Res-Solid Earth*, 120: 6698–6721
- Agangi A, McPhie J, Kamenetsky V S. 2011. Magma chamber dynamics in a silicic LIP revealed by quartz: The mesoproterozoic Gawler Range Volcanics. *Lithos*, 126: 68–83
- Artemieva I M, Mooney W D. 2001. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study. *J Geophys Res*, 106: 16387–16414
- Bacchin M, Milligan P, Tracey R, Wynne P. 2008. New Gravity Anomaly Map of the Australian Region. 3rd ed. Canberra: Geoscience Australia
- Banas A, Stachel T, Phillips D, Shimizu N, Viljoen K S, Harris J W. 2009. Ancient metasomatism recorded by ultra-depleted garnet inclusions in diamonds from DeBeers Pool, South Africa. *Lithos*, 112: 736–746
- Bank C G, Bostock M G, Ellis R M, Cassidy J F. 2000. A reconnaissance teleseismic study of the upper mantle and transition zone beneath the Archean Slave craton in NW Canada. *Tectonophysics*, 319: 151–166
- Berman R G, Pehrsson S, Davis W J, Ryan J J, Qui H, Ashton K E. 2013. The Arrowsmith orogeny: Geochronological and thermobarometric constraints on its extent and tectonic setting in the Rae craton, with implications for pre-Nuna supercontinent reconstruction. *Precambrian Res*, 232: 44–69

- Berman R G, Sanborn-Barrie M, Stern R A, Carson C J. 2005. Tectonometamorphism at ca. 2.35 and 1.85 Ga in the Rae Domain, western Churchill Province, Nunavut, Canada: Insights from structural, metamorphic and *in situ* geochronological analysis of the southwestern Committee Bay Belt. *Canadian Miner*, 43: 409–442
- Betts P G, Giles D, Lister G S, Frick L R. 2002. Evolution of the Australian lithosphere. *Aust J Earth Sci*, 49: 661–695
- Bhattacharya B B, Shalivahan B B. 2002. The electric Moho underneath Eastern Indian Craton. *Geophys Res Lett*, 29: 14-1–14-4
- Bleeker W. 2003. The late Archean record: A puzzle in ca. 35 pieces. *Lithos*, 71: 99–134
- Bologna M S, Dragone G N, Muzio R, Peel E, Nuñez-Demarcó P, Ussami N. 2019. Electrical structure of the lithosphere from Rio de la plata Craton to Paraná Basin: Amalgamation of cratonic and refertilized lithospheres in SW Gondwanaland. *Tectonics*, 38: 77–94
- Bostock M G. 1998. Mantle stratigraphy and evolution of the Slave province. *J Geophys Res*, 103: 21183–21200
- Budd A R, Skirrow R G. 2007. The nature and origin of gold deposits of the Tarcoola goldfield and implications for the central Gawler gold province, South Australia. *Econ Geol*, 102: 1541–1563
- Cagniard L. 1953. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18: 605–635
- Chardon D, Jayananda M, Chetty T R K, Peucat J J. 2008. Precambrian continental strain and shear zone patterns: South Indian case. *J Geophys Res*, 113: B08402
- Chave A D, Jones A G. 2012. The Magnetotelluric Method: Theory and Practice. Cambridge: Cambridge University Press
- Cook F A, van der Velden A J, Hall K W, Roberts B J. 1999. Frozen subduction in Canada's northwest territories: Lithoprobe deep lithospheric reflection profiling of the western Canadian Shield. *Tectonics*, 18: 1–24
- Davis W, Jones A G, Bleeker W, Grütter H. 2003. Lithosphere development in the Slave craton: A linked crustal and mantle perspective. *Lithos*, 71: 575–589
- de Wit M J, de Ronde C E J, Tredoux M, Roering C, Hart R J, Armstrong R A, Green R W E, Peberdy E, Hart R A. 1992. Formation of an Archaean continent. *Nature*, 357: 553–562
- Dong H, Wei W, Ye G, Jin S, Jones A G, Jing J, Zhang L, Xie C, Zhang F, Wang H. 2014. Three-dimensional electrical structure of the crust and upper mantle in Ordos Block and adjacent area: Evidence of regional lithospheric modification. *Geochem Geophys Geosyst*, 15: 2414–2425
- Dong Z, Tang J, Unsworth M, Chen X. 2015. Electrical resistivity structure of the upper mantle beneath Northeastern China: Implications for rheology and the mechanism of craton destruction. *J Asian Earth Sci*, 100: 115–131
- Evans R L, Jones A G, Garcia X, Muller M, Hamilton M, Evans S, Fourie C J S, Spratt J, Webb S, Jelsma H, Hutchins D. 2011. Electrical lithosphere beneath the Kaapvaal craton, southern Africa. *J Geophys Res*, 116: B04105
- Evans S, Jones A G, Spratt J, Katsube J. 2005. Central Baffin electromagnetic experiment (CBEX): Mapping the North American Central Plains (NACP) conductivity anomaly in the Canadian arctic. *Phys Earth Planet Inter*, 150: 107–122
- Fishwick S, Rawlinson N. 2012. 3-D structure of the Australian lithosphere from evolving seismic datasets. *Aust J Earth Sci*, 59: 809–826
- Fouch M J, James D E, VanDecar J C, van L S, Group K S. 2004. Mantle seismic structure beneath the Kaapvaal and Zimbabwe Cratons. *South African J Geol*, 107: 33–44
- Fullea J, Muller M R, Jones A G. 2011. Electrical conductivity of continental lithospheric mantle from integrated geophysical and petrological modeling: Application to the Kaapvaal Craton and Rehoboth Terrane, southern Africa. *J Geophys Res*, 116: 6267–6269
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, Liu X M, Liu Y S, Xu W L, Ling W L, Ayers J, Wang X C, Wang Q H. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892–897
- Gokarn S G, Gupta G, Rao C K. 2004. Geoelectric structure of the Dharwar Craton from magnetotelluric studies: Archean suture identified along the Chitradurga-Gadag schist belt. *Geophys J Int*, 158: 712–728
- Hand M, Reid A, Jagodzinski L. 2007. Tectonic framework and evolution of the Gawler Craton, Southern Australia. *Econ Geol*, 102: 1377–1395
- Heinson G S, Direen N G, Gill R M. 2006. Magnetotelluric evidence for a deep-crustal mineralizing system beneath the Olympic Dam iron oxide copper-gold deposit, southern Australia. *Geology*, 34: 573–576
- Jiang M, Ai Y, Chen L, Yang Y. 2013. Local modification of the lithosphere beneath the central and western North China Craton: 3-D constraints from Rayleigh wave tomography. *Gondwana Res*, 24: 849–864
- Jones A G. 1999. Imaging the continental upper mantle using electromagnetic methods. *Lithos*, 48: 57–80
- Jones A G. 2013. Imaging and observing the electrical Moho. *Tectonophysics*, 609: 423–436
- Jones A G, Evans R L, Muller M R, Hamilton M P, Miensopust M P, Garcia X, Cole P, Ngwisanyi T, Hutchins D, Fourie C J S, Jelsma H, Evans S, Aravanis T, Pettit W, Webb S, Wasborg J. 2009. Area selection for diamonds using magnetotellurics: Examples from southern Africa. *Lithos*, 112: 83–92

- Jones A G, Ferguson I J. 2001. The electric Moho. *Nature*, 409: 331–333
- Jones A G, Ferguson I J, Chave A D, Evans R L, McNeice G W. 2001. Electric lithosphere of the Slave craton. *Geology*, 29: 423–426
- Jones A G, Fishwick S, Evans R L, Muller M R, Fulla J. 2013. Velocity-conductivity relations for cratonic lithosphere and their application: Example of Southern Africa. *Geochem Geophys Geosyst*, 14: 806–827
- Jones A, Lezaeta P, Ferguson I J, Chave A D, Evans R L, Garcia X, Spratt J. 2003. The electrical structure of the Slave craton. *Lithos*, 71: 505–527
- Jones A G, Snyder D, Hanmer S, Asudeh I, White D, Eaton D, Clarke G. 2002. Magnetotelluric and teleseismic study across the Snowbird Tectonic Zone, Canadian Shield: A Neoarchean mantle suture? *Geophys Res Lett*, 29: 10-1–10-4
- Kariya K A, Shankland T J. 1983. Electrical conductivity of dry lower crustal rocks. *Geophysics*, 48: 52–61
- Khoza D, Jones A G, Muller M R, Evans R L, Webb S J, Miensopest M. 2013. Tectonic model of the Limpopo belt: Constraints from magnetotelluric data. *Precambrian Res*, 226: 143–156
- Krystopowicz N J, Currie C A. 2013. Crustal eclogitization and lithosphere delamination in orogens. *Earth Planet Sci Lett*, 361: 195–207
- Kumar P, Yuan X, Kumar M R, Kind R, Li X, Chadha R K. 2007. The rapid drift of the Indian tectonic plate. *Nature*, 449: 894–897
- Kusham A P, Pradeep N B, Naganjaneyulu K. 2018a. Lithospheric architecture in the Archaean Dharwar craton, India: A magnetotelluric model. *J Asian Earth Sci*, 163: 43–53
- Kusham A P, Pradeep N B, Naganjaneyulu K. 2018b. A magnetotelluric study from over Dharwar cratonic nucleus into Billigiri Rangan charnockitic massif, India. *Phys Earth Planet Inter*, 280: 32–39
- Kusham A P, Pradeep N B, Naganjaneyulu K. 2019. Crustal and lithospheric mantle conductivity structure in the Dharwar craton, India. *J Asian Earth Sci*, 176: 253–263
- Kusky T M. 1998. Tectonic setting and terrane accretion of the Archean Zimbabwe craton. *Geology*, 26: 163–166
- Lee C T A, Luffi P, Chin E J. 2011. Building and destroying continental mantle. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 39: 59–90
- Liu L, Hasterok D. 2016. High-resolution lithosphere viscosity and dynamics revealed by magnetotelluric imaging. *Science*, 353: 1515–1519
- Maier R, Heinson G, Thiel S, Selway K, Gill R, Scroggs M. 2007. A 3D lithospheric electrical resistivity model of the Gawler Craton, Southern Australia. *Appl Earth Sci*, 116: 13–21
- Malleswari D, Veeraswamy K, Abdul Azeez K K, Gupta A K, Babu N, Patro P K, Harinarayana T. 2019. Magnetotelluric investigation of lithospheric electrical structure beneath the Dharwar Craton in south India: Evidence for mantle suture and plume-continental interaction. *Geosci Front*, 10: 1915–1930
- Mandal P. 2017. Lithospheric thinning in the Eastern Indian Craton: Evidence for lithospheric delamination below the Archean Singhbhum Craton? *Tectonophysics*, 698: 91–108
- Miensopest M P, Jones A G, Muller M R, Garcia X, Evans R L. 2011. Lithospheric structures and Precambrian terrane boundaries in northeastern Botswana revealed through magnetotelluric profiling as part of the Southern African Magnetotelluric Experiment. *J Geophys Res*, 116: 1161–1172
- Muller M R, Jones A G, Evans R L, Grütter H S, Hattton C, Garcia X, Hamilton M P, Miensopest M P, Cole P, Ngwisanyi T, Hutchins D, Fourie C J, Jelsma H A, Evans S F, Aravanis T, Pettit W, Webb S J, Wasborg J. 2009. Lithospheric structure, evolution and diamond prospectivity of the Rehoboth Terrane and western Kaapvaal Craton, southern Africa: Constraints from broadband magnetotellurics. *Lithos*, 112: 93–105
- Naganjaneyulu K, Santosh M. 2012. The nature and thickness of lithosphere beneath the Archean Dharwar Craton, southern India: A magnetotelluric model. *J Asian Earth Sci*, 49: 349–361
- Naqvi S M. 2005. Geology and Evolution of the Indian Plate (From Hadean to Holocene 4 Ga to 4 Ka). New Delhi: Capital publishing Company
- Pankhurst M J, Schaefer B F, Betts P G, Phillips N, Hand M. 2011. A mesoproterozoic continental flood rhyolite province, the Gawler Ranges, Australia: The end member example of the Large Igneous Province clan. *Solid Earth*, 2: 25–33
- Rocha N S, Fontes S L, La Terra E F, Fuck R A. 2019. Lithosphere structures of the Parnaíba Basin and adjacent provinces revealed by deep magnetotelluric imaging. *J South Am Earth Sci*, 92: 1–11
- Saha A K. 1994. Crustal evolution of Singhbhum-North Orissa Eastern India. Bangalore: Geological Society of India. 341
- Santosh M. 2010. Assembling North China Craton within the Columbia supercontinent: The role of double-sided subduction. *Precambrian Res*, 178: 149–167
- Santosh M, Yang Q Y, Shaji E, Tsunogae T, Mohan M R, Satyanarayanan M. 2015. An exotic Mesoarchean microcontinent: The Coorg Block, southern India. *Gondwana Res*, 27: 165–195
- Selway K. 2014. On the causes of electrical conductivity anomalies in tectonically stable lithosphere. *Surv Geophys*, 35: 219–257
- Selway K. 2019. Electrical discontinuities in the continental lithosphere imaged with magnetotellurics. In: Yuan H, Romanowicz B, eds. Lithospheric Discontinuities. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons. 89–109

- Selway K M, Hand M, Payne J L, Heinson G S, Reid A. 2011. Magnetotelluric constraints on the tectonic setting of Grenville-aged orogenesis in central Australia. *J Geol Soc*, 168: 251–264
- Shalivahan S, Bhattacharya B B, Rao N V C, Maurya V P. 2014. Thin lithosphere-aesthenosphere boundary beneath Eastern Indian craton. *Tectonophysics*, 612–613: 128–133
- Shalivahan S, Bhattacharya B B. 2005. Electrical anisotropy of asthenosphere in a region of window to mantle underneath Eastern Indian craton. *Phys Earth Planet Inter*, 152: 43–61
- Simpson F, Bahr K. 2005. Practical Magnetotellurics. Cambridge: Cambridge University Press
- Sibson R H. 1994. Crustal stress, faulting and fluid flow. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 78: 69–84
- Snyder D B, Craven J A, Pilkington M, Hillier M J. 2015. The 3-dimensional construction of the Rae craton, central Canada. *Geochem Geophys Geosyst*, 16: 3555–3574
- Snyder D B, Hillier M J, Kjarsgaard B A, de Kemp E A, Craven J A. 2014. Lithospheric architecture of the Slave craton, northwest Canada, as determined from an interdisciplinary 3-D model. *Geochem Geophys Geosyst*, 15: 1895–1910
- Spratt J E, Skulski T, Craven J A, Jones A G, Snyder D B, Kiyan D. 2014. Magnetotelluric investigations of the lithosphere beneath the central Rae craton, mainland Nunavut, Canada. *J Geophys Res-Solid Earth*, 119: 2415–2439
- Spratt J E, Jones A G, Jackson V A, Collins L, Avdeeva A. 2009. Lithospheric geometry of the Wopmay orogen from a Slave craton to Bear Province magnetotelluric transect. *J Geophys Res*, 114: 549
- Spratt J E, Jones A G, Corrigan D, Hogg C. 2013. Lithospheric geometry revealed by deep-probing magnetotelluric surveying, Melville Peninsula, Nunavut. Geological Survey of Canada, doi: 10.4095/292482
- Stern R A, Bleeker W. 1998. Age of the world's oldest rocks refined using Canada's SHRIMP: The Acasta Gneiss Complex, Northwest Territories, Canada. *Geosci Can*, 25: 27–31
- Swain G, Barovich K, Hand M, Ferris G, Schwarz M. 2008. Petrogenesis of the St Peter Suite, southern Australia: Arc magmatism and Proterozoic crustal growth of the South Australian Craton. *Precambrian Res*, 166: 283–296
- Swain G, Woodhouse A, Hand M, Barovich K, Schwarz M, Fanning C M. 2005. Provenance and tectonic development of the late Archaean Gawler Craton, Australia: U-Pb zircon, geochemical and Sm-Nd isotopic implications. *Precambrian Res*, 141: 106–136
- Tang Y C, Chen Y J, Zhou S Y, Ning J Y, Ding Z F. 2013. Lithosphere structure and thickness beneath the North China Craton from joint inversion of ambient noise and surface wave tomography. *J Geophys Res-Solid Earth*, 118: 2333–2346
- Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, Su B X. 2013. Widespread refertilization of cratonic and circum-cratonic lithospheric mantle. *Earth-Sci Rev*, 118: 45–68
- Thiel S. 2008. Modelling and inversion of magnetotelluric data for 2-D and 3-D lithospheric structure, with application to obducted and subducted terranes. Dissertation for Doctoral Degree. Adelaide: University of Adelaide
- Thiel S, Heinson G. 2010. Crustal imaging of a mobile belt using magnetotellurics: An example of the Fowler Domain in South Australia. *J Geophys Res*, 115: 3659–3667
- Thiel S, Heinson G. 2013. Electrical conductors in Archean mantle—Result of plume interaction? *Geophys Res Lett*, 40: 2947–2952
- Tikhonov A N. 1950. On determination of electric characteristics of deep layers of the Earth's crust. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 151: 295–297
- Tomkins A G, Mavrogenes J A. 2002. Mobilization of gold as a polymetallic melt during pelite anatexis at the challenger deposit, South Australia: A metamorphosed archaean gold deposit. *Econ Geol*, 97: 1249–1271
- Van Reenen D D, Barton J M, Roering C, Smith C A, Van Schalkwyk J F. 1987. Deep crystal response to continental collision: The Limpopo belt of southern Africa. *Geology*, 15: 11–14
- Viejo G F, Clowes R M. 2003. Lithospheric structure beneath the Archaean Slave Province and Proterozoic Wopmay orogen, north-western Canada, from a lithoprobe refraction/wide-angle reflection survey. *Geophys J Int*, 153: 1–19
- Wang C Y, Sandvol E, Zhu L, Lou H, Yao Z, Luo X. 2014. Lateral variation of crustal structure in the Ordos block and surrounding regions, North China, and its tectonic implications. *Earth Planet Sci Lett*, 387: 198–211
- Wang D, Mookherjee M, Xu Y, Karato S I. 2006. The effect of water on the electrical conductivity of olivine. *Nature*, 443: 977–980
- Wang Q, Bagdassarov N, Ji S. 2013. The Moho as a transition zone: A revisit from seismic and electrical properties of minerals and rocks. *Tectonophysics*, 609: 395–422
- Xu Y G, Ma J L, Frey F A, Feigenson M D, Liu J F. 2005. Role of lithosphere-aesthenosphere interaction in the genesis of Quaternary alkali and tholeiitic basalts from Datong, western North China Craton. *Chem Geol*, 224: 247–271
- Yang X. 2011. Origin of high electrical conductivity in the lower continental crust: A review. *Surv Geophys*, 32: 875–903
- Yin Y, Jin S, Wei W, Santosh M, Dong H, Xie C. 2016. Construction and destruction of the North China Craton with implications for metallogeny: Magnetotelluric evidence from the Hengshan-Wutai-Fuping region within Trans-North China Orogen. *Gondwana Res*, 40: 21–42

- Yin Y, Jin S, Wei W, Ye G, Jing J, Zhang L, Dong H, Xie C, Liang H. 2017b. Lithospheric rheological heterogeneity across an intraplate rift basin (Linfen Basin, North China) constrained from magnetotelluric data: Implications for seismicity and rift evolution. *Tectonophysics*, 717: 1–15
- Yin Y, Wei W, Jin S, Santosh M. 2017a. Fossil oceanic subduction zone beneath the western margin of the Trans-North China Orogen: Magnetotelluric evidence from the Lüliang Complex. *Precambrian Res*, 303: 54–74
- Yoshino T, Matsuzaki T, Shatskiy A, Katsura T. 2009. The effect of water on the electrical conductivity of olivine aggregates and its implications for the electrical structure of the upper mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 288: 291–300
- Yoshino T, Nishi M, Matsuzaki T, Yamazaki D, Katsura T. 2008. Electrical conductivity of majorite garnet and its implications for electrical structure in the mantle transition zone. *Phys Earth Planet Inter*, 170: 193–200
- Youssof M, Thybo H, Artemieva I M, Levander A. 2013. Moho depth and crustal composition in Southern Africa. *Tectonophysics*, 609: 267–287
- Zhang H, Huang Q, Zhao G, Guo Z, Chen Y J. 2016. Three-dimensional conductivity model of crust and uppermost mantle at the northern Trans North China Orogen: Evidence for a mantle source of Datong volcanoes. *Earth Planet Sci Lett*, 453: 182–192

(责任编辑: 陈凌)