中国科学: 地球科学 2014 年 第 44 卷 第 11 期: 2358 ~ 2372
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

评 述

克拉通岩石圈减薄与破坏

吴福元[①*], 徐义刚[②], 朱日祥[①], 张国伟[③]

① 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;
② 中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640;
③ 西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069
* E-mail: wufuyuan@mail.igcas.ac.cn

收稿日期: 2014-07-03; 接受日期: 2014-10-08; 网络版发表日期: 2014-10-28
国家自然科学基金项目(批准号: 41130313, 91014007)资助

摘要 我国华北克拉通在显生宙期间曾发生过>100 km 的岩石圈减薄, 并伴随克拉通的破坏. 但如何认识该克拉通破坏的机制及在全球大陆演化中的意义, 是目前需要深入研究的问题. 本文通过对地球上印度、巴西、南非、西伯利亚、东欧(波罗地)、北美等克拉通的总结发现, 岩石圈减薄是克拉通演化过程中经常见及的一种现象, 但减薄并不一定伴随破坏. 进一步深入研究表明, 大多数克拉通的减薄可能主要通过地幔柱或地幔上涌的热侵蚀而实现, 但目前还没有地幔柱或地幔上涌使克拉通发生破坏的实例. 对已发生破坏的北美和华北克拉通的研究揭示, 板块俯冲是导致克拉通破坏的重要原因. 俯冲大洋板块的脱水交代上覆地幔楔, 不仅可使其发生部分熔融而产生广泛的岩浆作用, 更重要的是使大陆岩石圈地幔失去原有的刚性特征而易于发生变形. 从这一过程出发, 大规模地壳来源的花岗岩和壳内韧性变形可视为克拉通破坏的岩石学与构造学标志.

关键词
减薄
破坏
地幔柱
俯冲
克拉通

大陆的表面主要由克拉通和造山带两大构造地质单元组成, 克拉通以其长期的稳定性而区别于造山带. 近几十年来的研究发现, 克拉通稳定的原因主要受控于其所具有的低密度、低水含量和巨厚的岩石圈根, 从而使其漂浮在对流的软流圈地幔之上, 且厚而干的岩石圈所具有的刚性特征使其能够在很大程度上抵御后期地质作用的改造而免于破坏(Sleep, 2005; Peslier 等, 2009; Lee 等, 2011). 因此常理认为, 克拉通是稳定的. 除了少数来自地球深部的岩浆活动外, 基本不发生岩石圈或地壳内部的构造变形、岩浆活动和成矿作用. 但是, 我国华北克拉通东部在显生宙期间则发生了明显的减薄与破坏, 使其原应具有的稳定特征荡然无存. 这就引出了一个重要的科学问题, 即原本稳定的克拉通为何能够被破坏. 针对这一问题, 国家自然科学基金委员会在 2007 年设立了"华北克拉通破坏"重大研究计划, 以期对这一重要地质现象产生的原因作更深入的研究. 通过近几年的工作, 对该克拉通破坏发生的时间、空间范围及其动力学机制等均取得了显著的进展(朱日祥等, 2012). 本文从全球对比角度出发(图 1), 分析克拉通的减薄与破坏是否是一个带有普遍性质的科学现象, 然后剖析以地幔柱为代表的深部热事件对克拉通岩石圈减薄与改造的影响, 进而通过与已破坏克拉通的对比来进一步理解华北克拉通破坏的原因.

中文引用格式: 吴福元, 徐义刚, 朱日祥, 等. 2014. 克拉通岩石圈减薄与破坏. 中国科学: 地球科学, 44: 2358–2372
英文引用格式: Wu F Y, Xu Y G, Zhu R X, et al. 2014. Thinning and destruction of the cratonic lithosphere: A global perspective. Science China: Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-014-4995-0

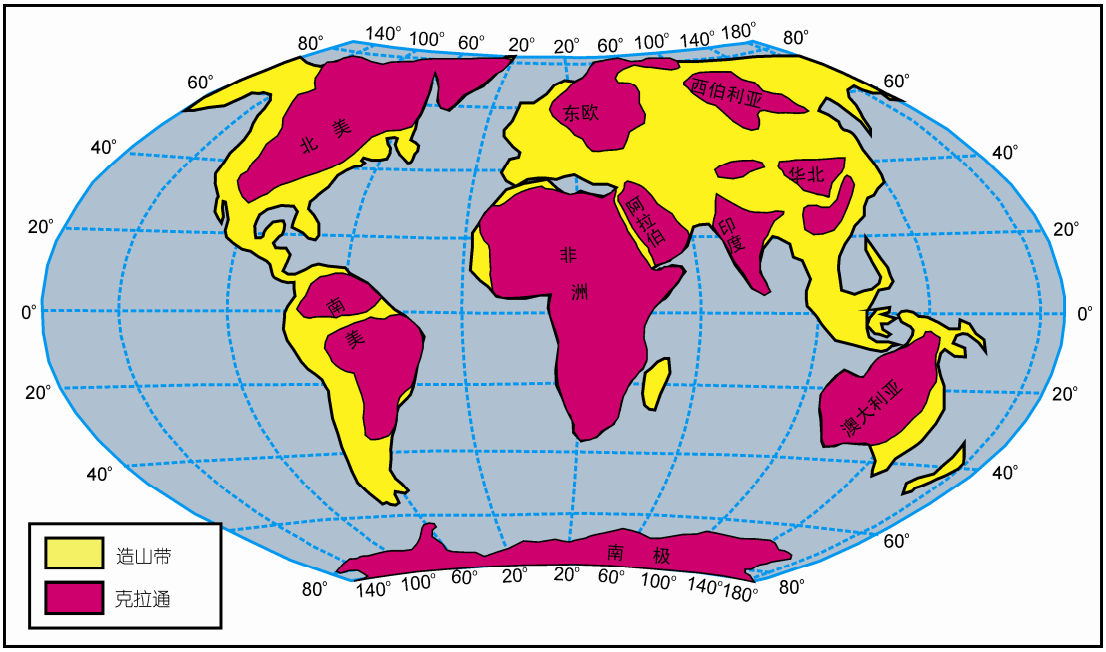


图 1　全球前寒武纪克拉通分布图

据 Sengor(1999)

1　定义: 岩石圈减薄与克拉通破坏

在当前华北克拉通破坏研究中, 岩石圈减薄与克拉通破坏的关系是目前认识还不很统一的问题, 而对它的理解是把握克拉通破坏研究的关键. 因此, 有必要在这里先讨论几个概念问题.

所谓的岩石圈减薄(lithospheric thinning)是指岩石圈厚度发生变化的现象, 它不涉及任何机制上的问题, 只是对某地质体或单元岩石圈厚度变化的一种描述. 从目前研究的情况来看, 大多数地区在其地质历史过程中都伴随有岩石圈厚度的变化. 在造山带地区, 岩石圈的减薄较为常见(Krystopowicz 和 Currie, 2013). 就华北地区而言, 由古生代(~480 Ma)金伯利岩中地幔包体和金刚石中所含矿物捕掳体所制约的当时岩石圈的厚度约为 200 km; 而新生代玄武岩中地幔包体所制约的岩石圈厚度多<80 km, 这也与地球物理资料一致(路凤香等, 1991; Menzies 等, 1993; Griffin 等, 1998). 这样, 从 480 Ma 至今, 华北岩石圈的厚度减薄了 100 km 左右. 至于减薄机制, 目前争论很大(吴福元等, 2008), 但无论何种机制, 均以华北曾发生过岩石圈减薄为共识.

但是, 最近也有学者对上述减薄现象提出怀疑(张旗, 2011), 其主要理由是认为山东蒙阴和辽宁复县(瓦房店)的金伯利岩来源范围有限, 不能代表华北地区的全部. 或者说, 只是上述两地区及其附近发生过减薄, 而其他地区并未发生该过程. 我们不拟对这一论点做全面的分析和讨论, 只是提出以下几点供大家参考: 其一, 华北自约 18 亿年克拉通化以后, 基本保持其整体的演化特征. 在岩石圈减薄较弱或基本未减薄的西部地区, 目前获得的岩石圈厚度也在 200 km 左右(Chen 等, 2008), 与古生代时的蒙阴和复县地区类似, 从而表明当时的华北克拉通整体上应具有厚的岩石圈. 其二, 世界上任何地区岩石圈厚度的确定都是根据有限地区的资料得出的, 我们不可能期望一个克拉通, 它在特定的地质时期到处都发育有金伯利岩. 即使有广布的金伯利岩, 也不见得每个地点都有可供进行岩石圈厚度计算的地幔包体或矿物捕虏晶. 第三, 目前大家所论述的岩石圈实质上是热岩石圈, 它的厚度是通过岩石圈传导性质的地热增温线和软流圈对流地温线资料共同约束的(McKenzie 和 Bickle, 1988). 软流圈的温度是大体已知的, 它的绝热上升决定了任何地区岩石圈底界的温度是大体相同的, 而克拉通本身的地热增温线主要受控于其厚度, 即厚度越大, 地热增温率越低.很难想象, 一个地区, 特别是克拉通, 它的岩石圈厚度在很有限的空间范围内就发生明显的改变, 除非它

是造山带.

关于克拉通破坏(cratonic destruction), 目前并无严格的定义, 我们一般把克拉通失去稳定性的过程称之为破坏(吴福元等, 2008), 或者去克拉通化(decratonization)或去稳定化(destabilization)等(Yang 等, 2009). 顾名思义, 克拉通被破坏以后, 它便不再具有稳定克拉通的特点, 除非由于某种过程使其再次发生克拉通化而趋于稳定. 从地质记录来看, 稳定的标志就是克拉通化以后的沉积盖层基本保持其原始的水平沉积状态. 对于缺乏沉积盖层的地盾, 其主要标志是基底岩石明显缺乏后期的变质与变形改造. 在华北地区, 它的东部在中生代表现为大范围强烈的岩浆活动与构造变形, 克拉通原有的稳定属性已不复存在. 从这一角度来看, "地台活化"与克拉通破坏较为接近, 但我们认为前者仍然属于一种描述性术语, 表示克拉通重新活动而不再稳定, 与克拉通破坏仍然有一定区别. 与上述定义相仿的还有郑建平(1999)提出的地幔置换, 和周新华(2009)强调的岩石圈转型等模型, 以强调减薄过程中深部岩石圈地幔组成及状态的改变. 从这一论述可以看出, 克拉通破坏与岩石圈减薄并不等同, 克拉通破坏可以伴随有岩石圈的减薄, 但岩石圈的减薄不一定表明其发生了破坏, 两者之间并不存在必然的联系.

与克拉通破坏相关的另一个重要地质作用过程是岩石圈改造(lithospheric modification). 我们说, 改造无处不在. 任何克拉通都处于全球特定的构造背景, 板块的俯冲、深部热异常的上升都会对克拉通不同部位和深度的地质体产生影响. 仅就岩浆作用而言, 所有的克拉通在形成后都会发生以金伯利岩为代表的深部岩浆作用, 包括各类碱性岩、煌斑岩和火成碳酸岩, 它们大多是深部地幔热柱活动或地幔上涌在克拉通上的表现. 但正如后面我们将要论述的那样, 绝大部分改造并不能使克拉通从整体上失去稳定性而发生破坏, 但改造可加速克拉通的破坏, 或者为克拉通的破坏提供某种先决条件. 在极端情况下, 克拉通破坏也可以被认为是大陆被改造的一种方式.

另一个值得讨论的问题是, 大陆裂解(continental break-up)是否可以称之为克拉通破坏. 我们说, 大陆裂解是指其由于某种机制而使其分裂为若干规模较小的块体的过程. 如果在这一过程中, 克拉通的稳定性仍然保留, 我们认为不能将其称之为克拉通破坏. 如在地质历史上, 存在过多次超大陆. 目前克拉通的分布就是古生代 Pangea 超大陆裂解的结果. 大西洋的张开使得非洲和南美洲、北美与欧洲分离, 但这些大陆中的古老地块在裂解后仍保持其稳定的克拉通特征.

2 岩石圈减薄是否一定伴随克拉通破坏?

华北以其巨厚的岩石圈减薄区别于世界上的其他克拉通(Carlson 等, 2005). 伴随岩石圈减薄, 该克拉通发生了破坏. 那岩石圈减薄与克拉通破坏是否存在必然的联系? 或者说, 岩石圈减薄是否一定伴随克拉通破坏? 下面我们来回顾世界其他经典克拉通的情况.

我们首先看看印度克拉通(图 2). 印度克拉通由北部 Aravalli 和 Bundelkhand 克拉通, 南部的 Dhawar, Bastar 和 Singhbhum 克拉通及两者之间的中央构造带所组成(Zhao 等, 2002). 该克拉通的早期地质演化历史与我国的华北极为相似(Zhao 等, 2003), 并可能具有 36 亿年的古老地质记录(Rajesh 等, 2009). 大约在 18 亿年左右, 南北克拉通块体沿中央造山带发生拼合, 并被克拉通化. 元古代期间, 该克拉通发育有稳定的未变质-变形的 Purana 沉积岩系. 其中一个较厚的位于 Dhawar 克拉通上的沉积岩系被归之为 Cudappah 盆地. 大约在 65 Ma 左右, 该克拉通被面积大约百万平方公里的德干(Deccan)玄武岩所覆盖(Courtillot 等, 1986; Duncan 和 Pyle, 1988).

作为世界上的典型克拉通之一, 印度克拉通保存有各式各样的非造山岩浆岩. 其中最著名的就是金伯利岩和各类煌斑岩. 特别是 Dhawar 克拉通东部的 Wajrakur 金伯利岩和 Bundelkhand 克拉通中的 Majhgawan 煌斑岩发育有丰富的金刚石资源, 是世界上金刚石最早(~4000 年前)被发现和利用的地区. 以前对这些金伯利岩的形成时代多有争议, 但新的资料证明, 它们基本都形成在 11 亿年左右, 是全球范围内一次重要的深部热事件(Kumar 等, 2007a; Chalapathi Rao 等, 2013). 更为重要的是, 这些金伯利岩含有丰富的幔源石榴橄榄岩和榴辉岩包体. 根据包体矿物组合, 结合金刚石的产出, 人们恢复出这些金伯利岩形成时的岩石圈厚度为 200 km 左右, 并具有 40~45 mW/m^2 左右的典型克拉通地温曲线(Nehru 和 Reddy, 1989; Rao 等, 2001; Griffin 等, 2009;

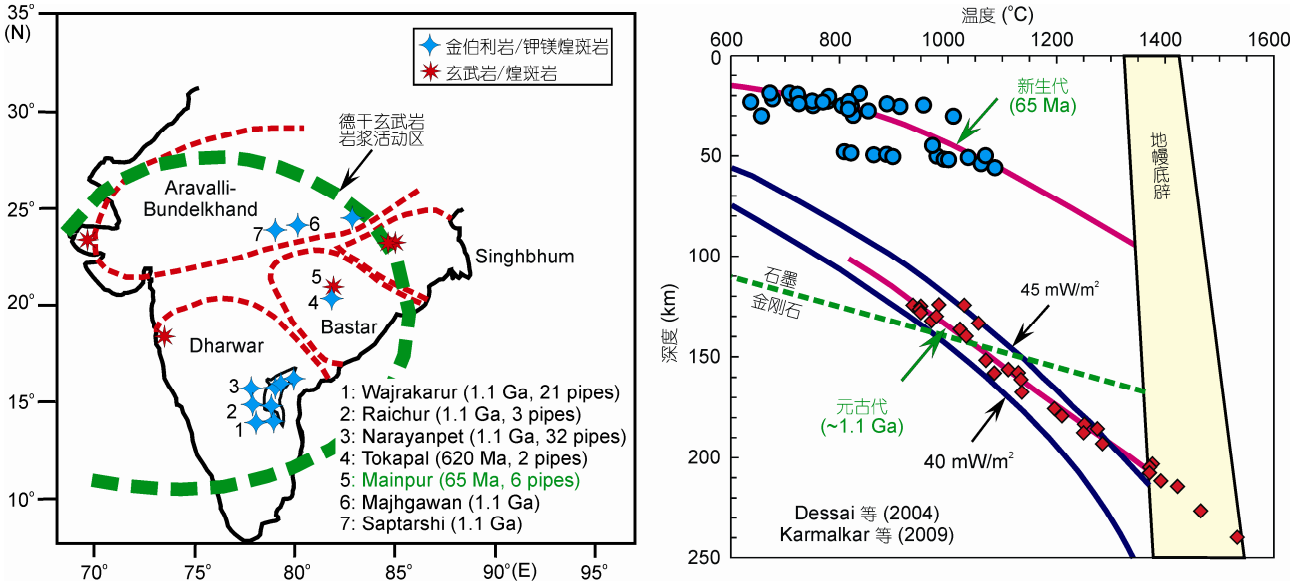


图 2　印度克拉通内部单元划分及不同时期岩石圈厚度对比

Karmalkar 等, 2009; 图 2).

同样, 在德干玄武岩喷发期间, 其西部地段形成的玄武岩和煌斑岩中也含有幔源橄榄岩包体. 但与金伯利岩中的不同, 这些橄榄岩包体主要为尖晶石相, 表明其来源深度小于 80 km(Mukherjee 和 Biswas, 1988; Karmalkar 等, 2000). 结合玄武岩和煌斑岩中麻粒岩包体的温压资料, 恢复出~65 Ma 左右 Dharwar 克拉通的岩石圈厚度在 80 km 左右(Dessai 等, 2004; Karmalkar 等, 2009; 图 1(b)), 这一结果也与现今地球物理探测结果相吻合(Roy 和 Rao, 2000; Sarkar 等, 2001; Gokarn 等, 2004; Sarkar 和 Saha, 2006; Kumar 等, 2007b; Kiselev 等, 2008; Shalivahan 等, 2014).

从上述情况可以看出, 印度克拉通从 11 亿年到 65 Ma, 其岩石圈发生了超过 100 km 的减薄, 其幅度与我国华北类似. 但与华北不同的是, 该克拉通在其形成后一直保持稳定, 元古代沉积岩系和德干玄武岩就像一层棉被一样覆盖在克拉通的上部而基本不显示任何变质-变形改造, 现今的地震活动也很少发育. 正是由于薄的岩石圈, 印度大陆才可以像猎豹一样, 快速地向北漂移而与欧亚大陆发生碰撞(Kumar 等, 2007b).

克拉通岩石圈减薄的第二个例子来自于西伯利亚克拉通, 它和南非克拉通一起, 被认为是全球克拉通的典型代表. 西伯利亚克拉通基底岩石出露较少, 只在南部的 Aldan 和北部的 Anabar 地盾中有所出露(图 3). 根据这两个地区的研究, 该克拉通也是在 18.5 亿年左右克拉通化而开始稳定的(Rosen 等, 2005). 整个克拉通在元古代-显生宙期间, 一直被大面积稳定的地台型沉积(里菲和文德系)所覆盖. 但是, 西伯利亚克拉通在稳定阶段发育多次非造山的岩浆活动. 仅就金伯利岩而言, 根据我们的研究, 该克拉通至少发育有四期岩浆活动, 分别为 420, 360, 220 及 160 Ma(Sun 等, 2014). 其中 360 Ma 的金伯利岩是该区金刚石的重要赋存岩石. 此外, 位于 Daldyn 岩区的 Udachnaya 岩管(360 Ma)和 Kuoika 岩区的 Obnajonnaya 岩管(160 Ma)含有丰富的地幔橄榄岩、榴辉岩及各类地壳包体, 是世界上研究深部岩石圈组成、性质及热状态的理想地区(Pearson 等, 2003; Howarth 等, 2014). 对这些金伯利岩中地幔捕虏体的研究发现(图 3), 古生代 360 Ma 的岩石圈厚度约在 200~220 km 以上, 具典型克拉通的低地温曲线; 而 160 Ma 的金伯利岩中, 地幔橄榄岩所构筑的地温线与古生代略有不同, 结合其不含任何金刚石的产出, 表明此时岩石圈的厚度在 150 km 左右(Taylor 等, 2003; Howarth 等, 2014). 该厚度与用石榴石巨晶所确定的 220 Ma Kharamai 金伯利岩喷发时的岩石圈厚度基本相当(Griffin 等, 2005), 即西伯利亚克拉通在 360~220 Ma 曾发生过约 50 km 的少量岩石圈减薄(Griffin 等, 1999; Howarth 等, 2014).

尽管 Griffin 等(1999)认为西伯利亚克拉通曾经

发生过少量岩石圈减薄, 并得到 Tychkov 等(2008)的支持, 但 Ashchepkov 等(2010)则认为, 该克拉通岩石圈减薄幅度不大, 或基本不存在减薄. 他们认为, Udachnaya 和 Obnajonnaya(Obnazhennaya)两岩管岩石圈厚度的变化则更多地与岩石圈的空间位置有关, 即 Obnajonnaya 岩管处于克拉通的北部边缘, 因而其岩石圈厚度可能稍薄. 但是, 在 Obnajonnaya 附近存在有 Mechimden(360 Ma), Kuoika(160 Ma), Upper Malodo(160 Ma)和 Toluopka(360 Ma)四个金伯利岩区, 石榴石地温线确定的古生代 Toluopka 岩管侵位时的岩石圈厚度为 180 km(Griffin 等, 1999), 与其他地区古生代情况类似, 表明区内岩石圈确实发生过岩石圈减薄, 只不过幅度不大.

再有一个实例来自南美克拉通. 该克拉通东临大西洋, 西部为太平洋的俯冲活动大陆边缘. 由于该克拉通的主体位于巴西境内, 所以又称巴西克拉通. 在南大西洋张开之前, 巴西克拉通与南非和南极等克拉通连接在一起. 该克拉通实际上面积巨大, 但大部分均被显生宙沉积所覆盖. 从区域来看, 巴西克拉通由西部的 Amazonas 和东部的 Sao Francisco 克拉通所组成(图 4), 具有复杂的太古代地质演化历史, 并在经历古元古、中元古和泛非三次造山事件后完成克拉通化(de Almeida 等, 2000). 巴西克拉通在白垩纪发育世界上典型的非造山岩浆岩, 包括金伯利岩、世界罕见的钾霞橄黄长岩、火成碳酸岩及碱性岩(Ulbrich 和 Gomes, 1981; Morbidelli 等, 1995), 其中火成碳酸岩是世界上 Nb-Ta 资源的主要来源之一(Cordeiro 等, 2011). 根据目前的年代学研究结果(Guarino 等, 2013), 早期含金刚石的金伯利岩浆活动时间大约在 90 Ma, 而其他不含金刚石的岩石大约形成在 70~90 Ma, 即比金伯利岩晚数个百万年. 对这些岩石中辉石捕虏晶的研究发现(Read 等, 2004), 岩石圈在上述时间范围内从约 200 km 减薄到 125 km, 即发生了大约 75 km 岩石圈的减薄.

因此, 从印度、西伯利亚和巴西克拉通情况来看, 克拉通岩石圈减薄并非华北独有, 它是克拉通演化

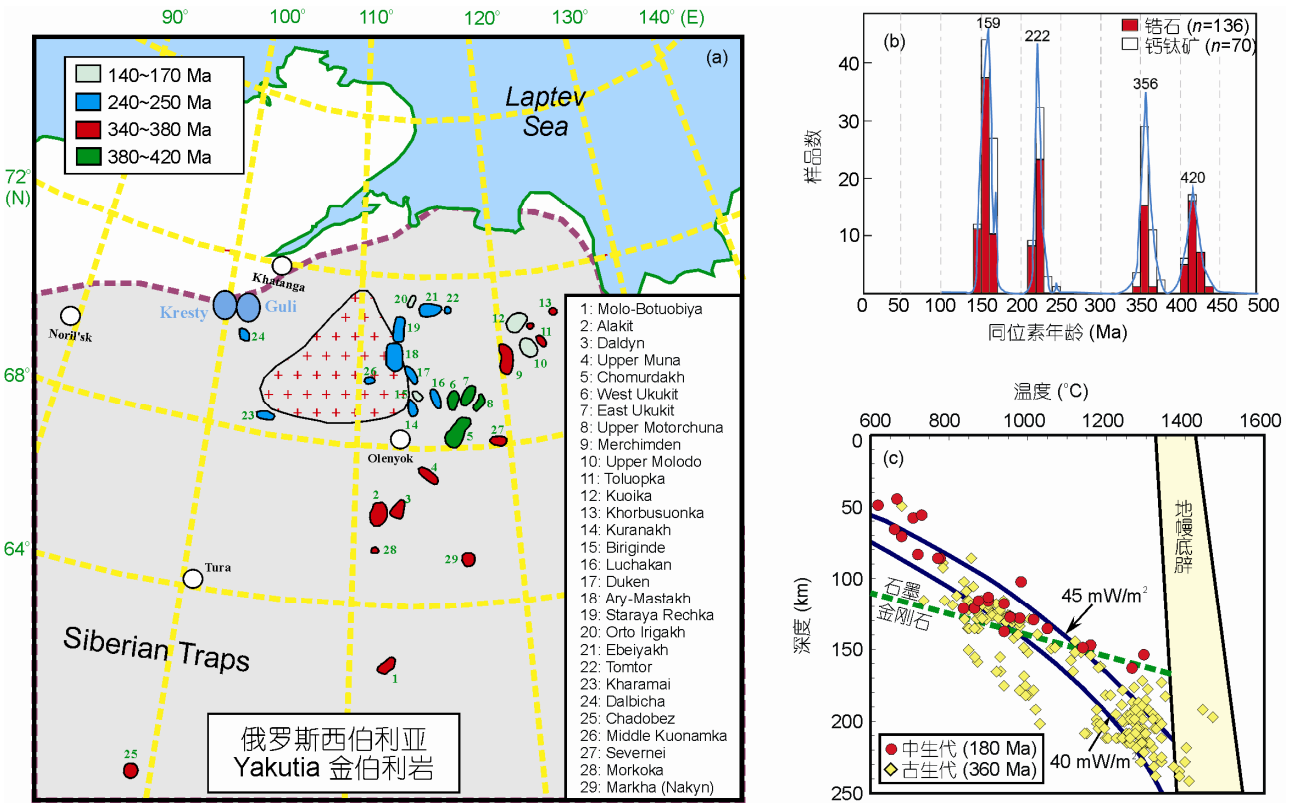


图 3　西伯利亚克拉通金伯利岩分布(a)、时代(b)及不同时期岩石圈厚度(c)

(c)资料来源于 Paleozoic(Udachnaya): Boyd(1984), Boyd 等(1997), Ionov 等(2010), Doucet 等(2013), Agashev 等(2013), Howarth 等(2014); Mesozoic(Obnajonnaya): Taylor 等(2003), Howarth 等(2014)

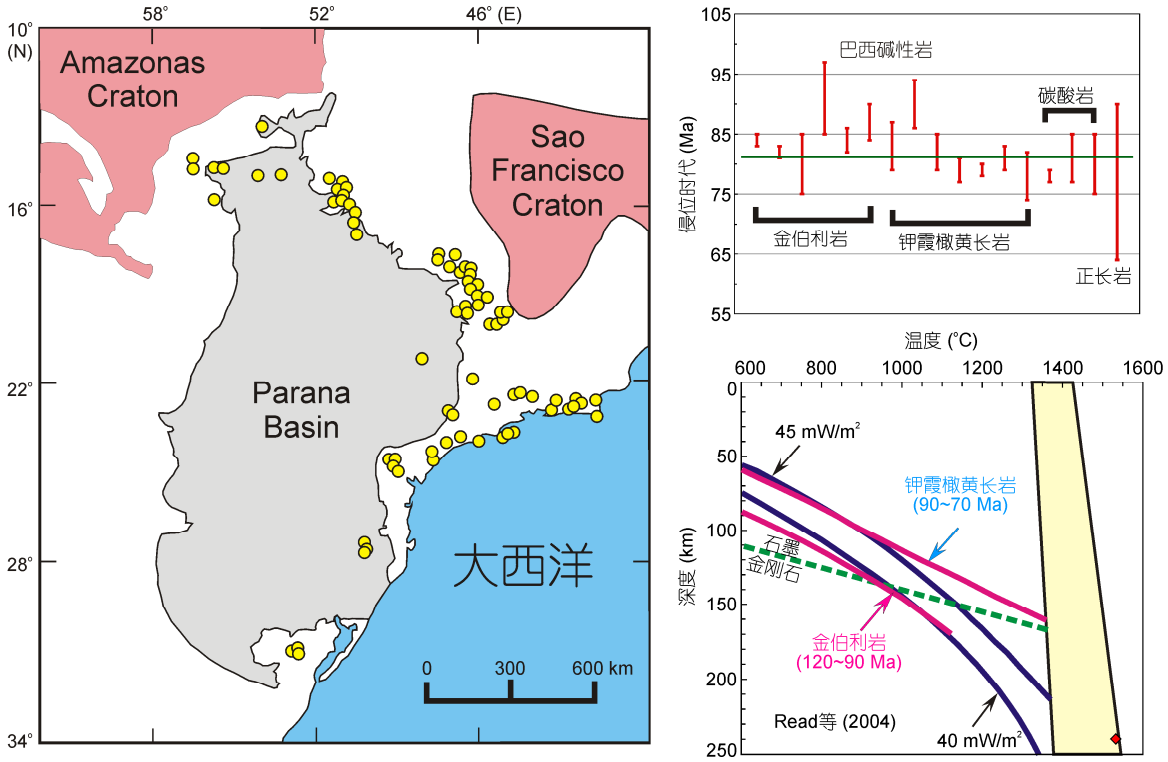


图 4　巴西克拉通白垩纪碱性岩分布、时代及不同时期岩石圈厚度对比

过程中经常发育的一种地质现象. 与华北不同的是, 尽管这些克拉通发生了岩石圈的减薄, 但均不伴随克拉通的破坏, 因为这些克拉通一直保持稳定.

3　地幔柱热侵蚀是否一定使克拉通岩石圈减薄?

在上述印度、西伯利亚和巴西克拉通的实例中, 岩石圈减薄的原因目前还讨论得不够充分. 德干玄武岩及相关岩石中的岩石包体已经证明, 德干玄武岩在喷发时其岩石圈已发生了减薄(Karmalkar 等, 2009), 且这些岩浆作用发育在晚期伸展作用之前(Hooper 等, 2009), 这就从事件的序列上排除了晚期机械拉伸作为印度克拉通减薄的原因. Griffin 等(2009)和 Shalivahan 等(2014)认为, 该克拉通的减薄可能是在中生代冈瓦纳大陆裂解过程中发生的, 但我们更倾向于认为, 德干地幔柱岩浆作用更可能是导致该克拉通岩石圈减薄的主要机制, 因为冈瓦纳大陆的裂解在印度大陆本身并没有留下太多的地质记录.

对西伯利亚克拉通, 正如前面所介绍的那样, 岩石圈减薄主要发生在 360~160 Ma. 360 Ma 的金伯利岩可能与 Yakutsk 地幔柱活动同时(Courtillot 等, 2010). 但此之后, 该克拉通所遭受的最重要地质事件是 250 Ma 前后的西伯利亚地幔柱(Basu 等, 1995; Renne 等, 1995; Reichow 等, 2009). 尽管目前提出该区玄武岩的发育可能与边界流(edge-driven convection)或拆沉等作用有关(King 和 Anderson, 1998; Elkins-Tanton, 2005), 但主流观点认为, 地幔柱是产生如此大面积巨量玄武岩喷发的直接原因(Saunders 等, 2005). 同样, 巴西克拉通减薄期间正是 Trindade 地幔柱活动时刻, 它在南美大陆分别形成 Parana-Etendaka 大火成岩省及本文介绍的 Minas-Goias(又称 Alto Paranaiba)碱性火成岩省(Gibson 等, 1995, 2006).

根据目前的研究, 地幔柱一般来自地球深部的核幔边界, 具有较高的温度(Campbell, 2007). 这种高温地幔上升至岩石圈底部时, 势必对岩石圈底部物质实现加热, 并使其软化, 然后在软流圈地幔水平流动作用的影响下发生移离, 即机械热侵蚀(Davies,

1994). 根据热模拟结果(Yuen 和 Fleitout, 1985), 对于1600℃的地幔柱而言, 使 200 km 厚的岩石圈减薄 50 和 100 km 分别需要 10 和 34 Ma 左右. 如果温度更高, 减薄的速度会更快, 或者在一定时间内, 减薄的幅度更大. 反之, 如果地幔柱规模小, 或只是一般情况下的地幔上涌时, 其温度低, 所造成的上覆克拉通减薄的幅度会很小, 甚至不能对克拉通形成有效的减薄(乔彦超等, 2013). 对德干和西伯利亚地区岩石的 Sr-Nd 同位素总结发现(图 5), 它们两者中的很多玄武质岩石明显具有较高的Sr同位素和较低的Nd同位素比值, 这也是该两区玄武岩与其他大火成岩省玄武岩的重要差别所在, 反映来自岩石圈物质的贡献. 即这些地区, 岩石圈通过陆下地幔的部分熔融而实现了减薄. 这一认识也得到最近对塔里木地幔柱研究的支持(Xu 等, 2014).

那是否全球所有克拉通的减薄都是由地幔柱或地幔上涌来实现呢? 下面我们以全球另外一个典型克拉通-南非克拉通来说明这一问题(图 6). 南非克拉通由北部的Zimbabwe和南部的Kaapvaal克拉通及中部的 Limpopo 造山带构成, 具有非常古老的形成历史. Kaapvaal 克拉通最早的地质记录可追溯到太古宙早期的巴伯顿绿岩带和斯威士兰片麻岩, 然后分别在 31, 26 和 18 亿年左右发生多次克拉通化, 之后进入稳定的克拉通发育阶段(de Wit 等, 1992; Schoene 等, 2008). 同其他克拉通一样, 南非克拉通在形成后也遭受到多期非造山岩浆事件的影响(Torsvik 等, 2010), 如 21 亿年的 Bushveld、11 亿年的 Umkondo 和 180 Ma 的 Karoo 基性岩浆事件(Jourdan 等, 2005; Kinnaird, 2005[1]); Hanson 等, 2006; Svensen 等, 2012). 就金伯利岩而言(Wu 等, 2011, 2013a), 它至少又可划分为 Kuruman(16 亿年)、Premier(12 亿年)、Venetia(5 亿年)、Jwaneng(2.5 亿年)和 Kimberley(1.4~0.9 亿年)五期. 然而, 出人意料的是, 该克拉通在其演化过程中一直保持稳定, 堪称稳定克拉通的代表. 岩石探针研究显示, 该克拉通的岩石圈厚度一直稳定在 200 km 以上(Bell 等, 2003; Pearson 等, 2003), 与地球物理探测所获得的目前岩石圈厚度一致(Fouch 等, 2004; Begg 等, 2009). 同样值得指出的是, 南美西北部 Amazonas 克拉通内的 Juina 金伯利岩(94 Ma), 这是目前被公认为来自于核幔边界的地幔柱, 因为在该岩管的金刚石中发现有来自核幔边界的矿物(Harte, 2010; Walter 等, 2011). 但事实上, Amazonas 克拉通也没有被破坏.

克拉通遭受地幔柱或地幔上涌影响, 但不发生岩石圈减薄和破坏的例子在世界上比比皆是. 即便以中国大陆为例, 扬子克拉通的西部在二叠纪曾受到峨眉山地幔柱的作用. 尽管目前还缺乏当时岩石圈是否发生过减薄的证据, 但扬子克拉通在当时并未发生破坏, 且有可能通过岩浆底侵作用而使区内岩石圈有所加厚(Xu 等, 2004). 在华北地区, 早古生代金伯利岩的形成可能与地幔柱关系密切, 它导致了该克拉通约 200 百万平方公里范围内早奥陶-早石炭世的全面抬升(Yang 等, 2009), 但没有证据表明华北在那时有过明显的岩石圈减薄或者破坏. 既然地

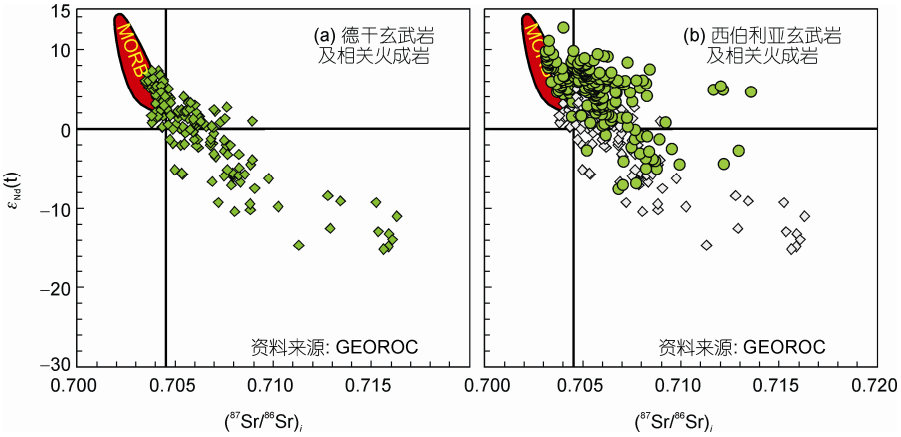


图 5　德干和西伯利亚大火成岩玄武岩 Sr-Nd 同位素成分

1) Kinnaird J A. 2005. The Bushveld large igneous province. http://www.largeigneousprovinces.org/LOM.html

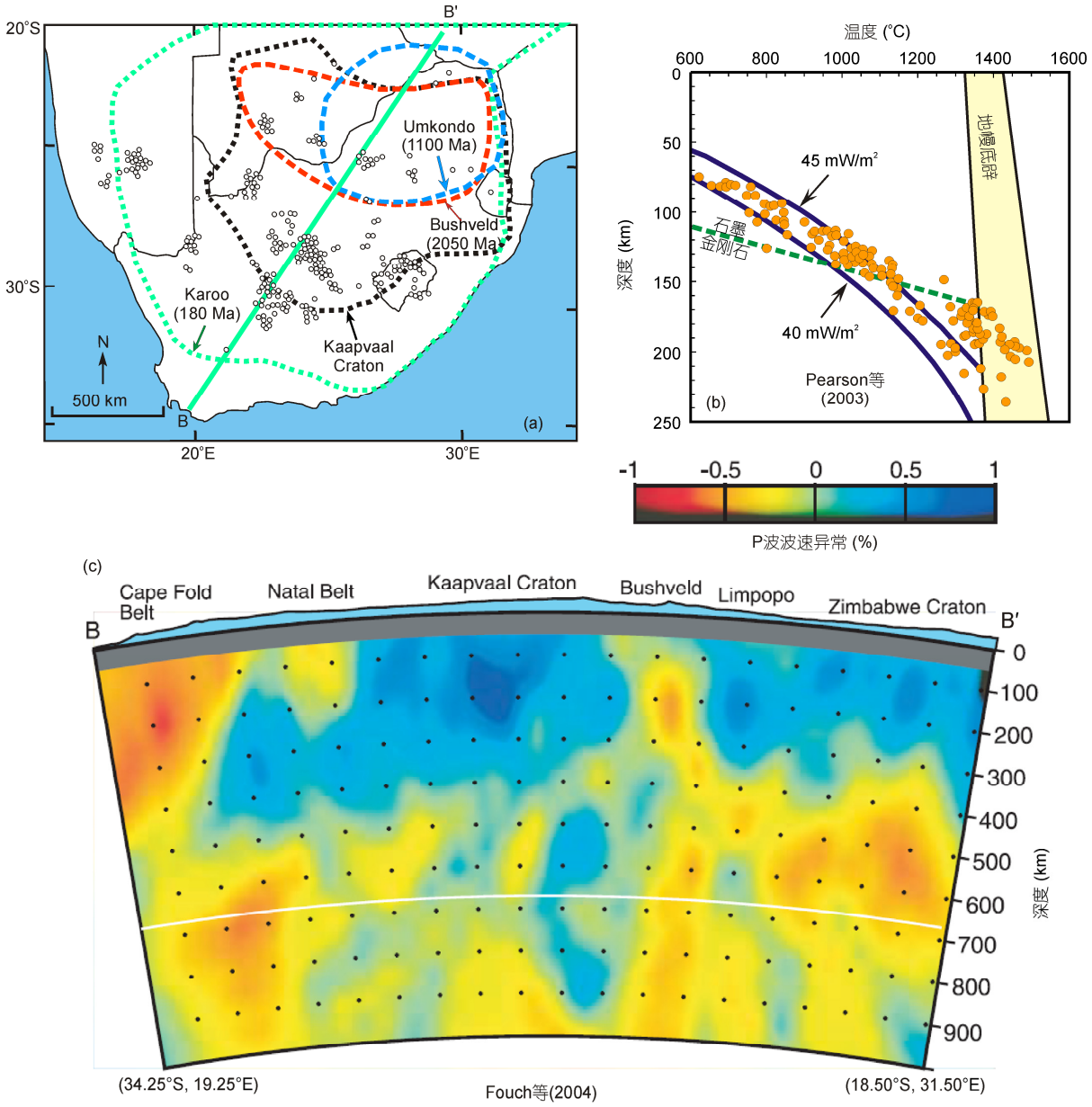


图 6　南非克拉通不同时期热事件分布(a)、金伯利岩中捕虏体反演的岩石圈厚度(b)和 P-波反演的南非先进岩石圈结构图(c)

(a)中的圆空心点示金伯利岩分布图, B-B′为(c)位置

幔柱的侵蚀作用可使克拉通岩石圈发生明显的减薄, 那么南非等克拉通在多次地幔柱的影响下却又为何保持其岩石圈厚度不变呢? 对这一问题的讨论已远远超出本文要论述的主题, 但我们在此提供东欧(又称波罗地)克拉通的例子作为进一步研究的参考. 在东欧克拉通北部的科拉半岛地区(图 7), 其早前寒武纪地质可划分为北部的 Kola 和南部的 Karelia 次级克拉通, 它们在 19 亿年前后沿 Kalo-Karelia 造山带发生碰撞拼合(Zhao 等, 2002), 然后进入克拉通演化阶段. 但该区在古生代发育了一套非常特色的非造山岩浆活动, 岩石类型包括金伯利岩、碱性岩、火成碳酸岩等, 其中 Khibiny 和 Lovozero 是世界上最大的两个碱性岩体. 根据目前的研究, 这些岩石形成在 380 Ma 左右一个非常短的时间范围内(Wu 等, 2013b), 且与

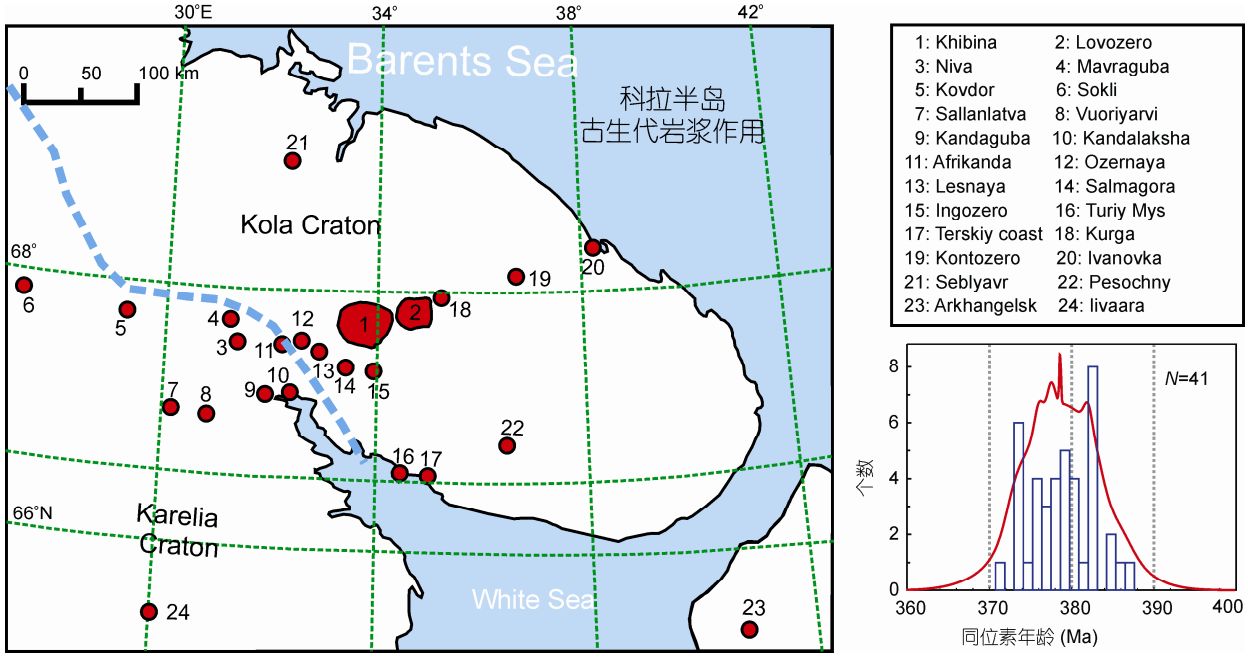


图 7　科拉半岛克拉通地体划分及古生代碱性岩分布与时代

地幔柱关系密切(Arzamastsev 等, 2001; Downes 等, 2005). 岩石探针和地球物理探测显示(Artemieva, 2003), 该克拉通岩石圈由约 40 km 厚的地壳和 180 km 厚的岩石圈地幔组成. 其中岩石圈地幔包括上部古老和下部年轻两部分, 推测该年轻的岩石圈地幔即为显生宙以来地幔柱作用期间新增生而成. 克拉通或许在地幔柱或地幔上涌作用期间发生过岩石圈减薄, 因为大面积拉斑玄武岩的出现, 要求其岩石圈的厚度一般不会超过 125 km(Ellam, 1992). 但地幔柱物质的大量熔融, 会产生密度较轻的残留, 而这些残留在晚期的冷却就会造成新岩石圈地幔的形成. 地幔柱温度越高或规模越大, 软流圈地幔熔融的程度也就越高, 形成的地幔残留也就越多, 或者说新增生岩石圈的规模就越大, 从而可以保持原有的岩石圈厚度不发生显著的减薄. 因此, 地幔柱能否使克拉通减薄与多种因素有关, 包括克拉通的大小与厚度、地幔柱的规模和强度以及是否存在岩石圈下新地幔的形成等(Petitjean 等, 2006).

4　全球已破坏克拉通的地质特征

在全球 35 个主要克拉通中(Bleeker, 2003), 北美是除华北以外的另外一个被破坏的克拉通. 北美大陆由数个克拉通组成(图 8), 包括南部的 Superior、中部的 Rae 和 Hearne、北部的 Slave 和西部的 Wyoming 克拉通等. 南部的 Superior 克拉通在 18~19 亿年期间通过 Trans-Hudson 造山带与北部的 Rae-Slave-Wyoming 克拉通拼合, 成为世界上稳定的大陆. 该大陆在形成后虽然遭受过多次深部巨型热事件的影响, 如著名的 1267~1268 Ma 的 MacKenzie 岩墙(Heaman 和 LeCheminant, 1993)、723 Ma 的 Franklin 岩墙(Heaman 和 Machado, 1992)、1109 Ma 的中部裂谷作用(Mid-continental rifting; Heaman 和 Machado, 1992), 以及全区广泛分布的多时代金伯利岩岩浆活动等(Heaman 等, 2003, 2004), 但该克拉通一直保持稳定. 然而在中生代期间, 西面太平洋板块的俯冲产生北美大陆西部的科迪勒拉(Cordillera)造山带, 并使 Wyoming 克拉通及南北两侧的 Yavapai-Mazatzal 和 Wopmay 古元古代造山带发生破坏(Dickinson, 2004).

下面我们来看看 Wyoming 克拉通更详细一点的资料. 该克拉通在 18~19 亿年形成后(Duebendorfer 和 Houston, 1987; Frost 等, 1998), 在其东部及其边缘形成的非造山岩浆岩有 Chicken Park(615 Ma)和 Iron Mountain(410 Ma)金伯利岩(Heaman 等, 2003), 此类非造山的岩浆活动一直持续到新生代, 并形成 Bearpaw, Highwood Mountains 等碱性程度极高的碱性岩-煌斑岩(Carlson 和 Irving, 1994; O'Brien 等, 1995; Downes 等, 2004), 显示稳定地块的岩石学特征. 太

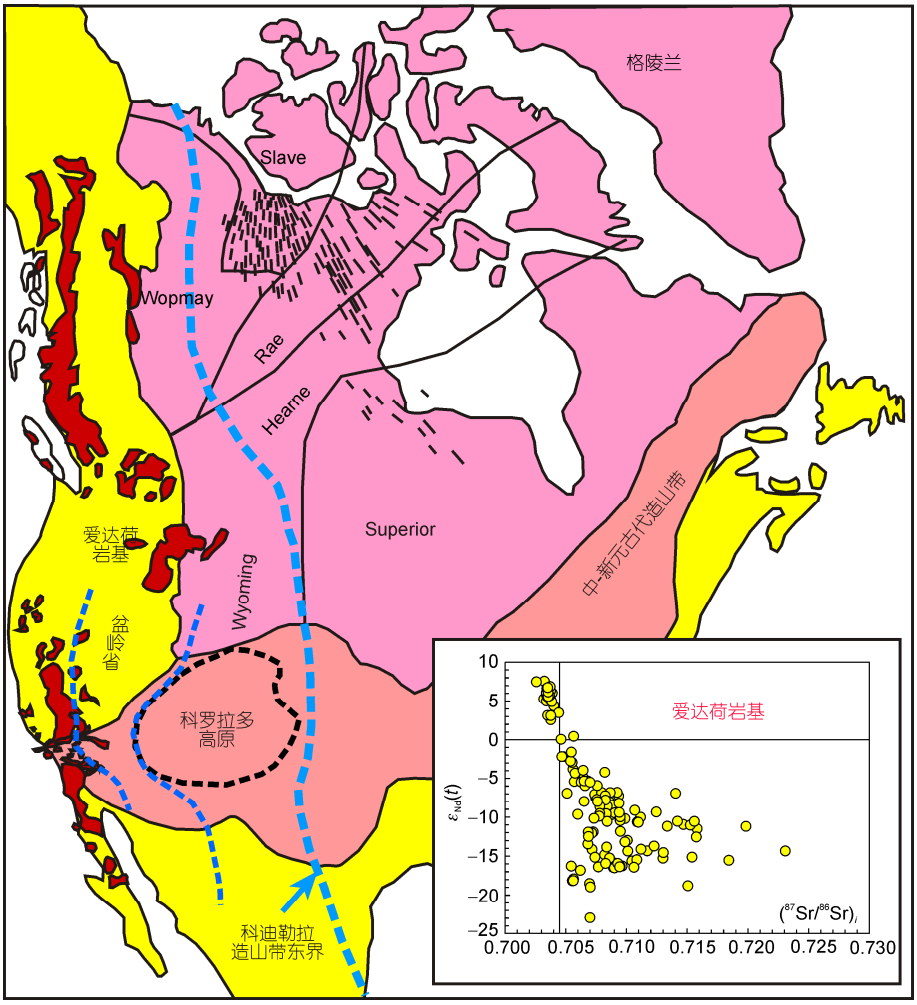


图 8　北美克拉通分布及西缘中生代花岗岩分布图

平洋板块俯冲期间, 整个北美大陆受到强烈的岩浆与变形作用改造, 其波及的范围深入内陆约 1500 km, 所形成的地质现象包括我们熟悉的 Cordillera 活动大陆边缘岩浆作用、科罗拉多高原、盆岭省等. 从岩浆作用角度来看, 太平洋板块的俯冲形成了北美著名的火山-侵入杂岩, 包括北部的 Rocky Mountains 和 Idaho 岩基及南部的 Sierra Nevada 和 Peninsula 岩基. 特别是 Idaho 岩基, 它就分布在 Wyoming 克拉通的西部边缘上, 其岩浆来自古老地壳物质的部分熔融(图 8, 插图), 与我国华北的情况及其类似. 在构造作用上, 该造山带主要表现为多期次的构造挤压和伸展变形, 其中最醒目的是以盆岭省为代表的伸展构造或变质核杂岩(Sonder 和 Jones, 1999). 很显然, 北美克拉通的西部在中-新生代期间已被严重地破坏而失去了稳定性.

根据多年来的研究结果, Wyoming 克拉通及相邻区域从中生代以来发生过显著的岩石圈减薄. 对于岩石圈减薄的原因, 目前分歧较大. 提出的观点有热侵蚀和拉伸等, 但主流观点认为, 加厚地壳的拆沉作用是该区岩石圈减薄的主要机制(Bird, 1979; Ducea 和 Saleeby, 1998; Lee 等, 2000; Zandt 等, 2004; Boyd 等, 2006).

Cordillera 地区为何能够形成上述讨论的花岗岩和变质核杂岩, 无疑对我们认识其他地区的演化提供了有价值的资料. 尽管提出的观点互有差异, 但基本都认为其与大洋板块的俯冲有关. 大洋板块的俯冲至少对上部的地幔楔产生两方面的影响. 其一, 俯冲板片的脱水, 会使上覆岩石的熔点降低, 进而部分

熔融产生岩浆, 这就是活动大陆边缘岩浆作用广泛发育的原因. 第二, 水的加入可有效降低岩石的粘性强度, 使之发生流变性失稳, 岩石圈易于发生各式类型的构造变形(Lenardic 等, 2003; Lee 等, 2011). 因此从地壳的角度来看, 作为已破坏的克拉通, Wyoming 地区以发育大量壳源花岗岩和地壳伸展变形为特征.

上述情况与我国华北克拉通极为类似, 因为除局部地域曾受到过古亚洲洋或古特提斯洋的影响外(马旭等, 2012; 陈斌等, 2013), 该克拉通的破坏大多认为与中生代太平洋板块的西向俯冲有关(Zhang 等, 2009; 郑永飞和吴福元, 2009; 朱日祥等, 2012; 李洪颜, 2013). 关于这一问题, 作者以前已有详尽的论述(吴福元等, 2008), 新的证据来自不同时代岩石水含量的研究(Xia 等, 2010, 2013), 此不再赘述. 但值得指出的是, 和北美西部的情况类似, 华北克拉通东部在破坏期间发育大量以花岗岩为代表的壳源岩浆活动(Wu 等, 2005), 以及以变质核杂岩为代表的区域伸展变形(Wang 等, 2012). 因此, 如果华北和北美代表了目前克拉通破坏的实例的话, 大规模花岗岩和变质核杂岩可分别被视为克拉通破坏的岩石学和构造地质学标志.

5 结论

通过以上全球主要克拉通演化特点的分析和总结, 我们可以得出如下结论: (1) 岩石圈减薄是地球上克拉通在演化过程中经常见到的地质现象, 但未必伴随克拉通破坏, 即岩石圈减薄不等于克拉通破坏; (2) 地幔柱或地幔上涌可以使克拉通岩石圈减薄, 但目前还没有使克拉通发生破坏的例子; (3) 克拉通破坏更可能与大洋板块俯冲作用有关; (4) 大规模花岗岩和变质核杂岩可视为克拉通破坏的岩石学和构造学标志.

致谢 感谢审稿人和郑永飞主编的详细审稿意见, 这些意见使得本文更加完善.

参考文献

陈斌, 牛晓露, 王志强, 等. 2013. 华北克拉通北缘姚家庄过钾质超镁铁岩-正长岩杂岩体的锆石 U-Pb 年代学、岩石学和地球化学特征. 中国科学: 地球科学, 43: 1073–1087

李洪颜. 2013. 华北克拉通原型盆地及岩浆活动时空演化对克拉通破坏的制约. 中国科学: 地球科学, 43: 1396–1409

路凤香, 韩柱国, 郑建平, 等. 1991. 辽宁复县地区古生代岩石圈地幔特征. 地质科技情报, 10(增刊): 2–20

马旭, 陈斌, 陈家富, 等. 2012. 华北克拉通北缘晚古生代岩体的成因和意义: 岩石学、锆石 U-Pb 年龄、Nd-Sr 同位素及锆石原位 Hf 同位素证据. 中国科学: 地球科学, 42: 1830–1850

乔彦超, 郭子祺, 石耀霖. 2013. 数值模拟华北克拉通岩石圈热对流侵蚀减薄机制. 中国科学: 地球科学, 43: 642–652

吴福元, 徐义刚, 高山, 等. 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

郑建平. 1999. 中国东部地幔置换作用与中新生代岩石圈减薄. 武汉: 中国地质大学出版社. 26

郑永飞, 吴福元. 2009. 克拉通岩石圈的生长和再造. 科学通报, 54: 1945–1949

周新华. 2009. 华北中-新生代大陆岩石圈转型的研究现状与方向. 高校地质学报, 15: 1–18

朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等. 2012. 华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 42: 1135–1159

张旗. 2011. 从"岩石圈减薄"到"克拉通破坏". 地球物理学进展, 26: 2262–2269

Agashev A M, Ionov D A, Pokhilenko N P, et al. 2013. Metasomatism in lithospheric mantle roots: Constraints from whole-rock and mineral chemical composition of deformed peridotite xenoliths from kimberlite pipe Udachnaya. Lithos, 160-161: 201–215

Artemieva I M. 2003. Lithospheric structure, composition, and thermal regime of the East European Craton: Implications for the subsidence of the Russian platform. Earth Planet Sci Lett, 213: 421–446

Arzamastsev A A, Bea F, Glaznev V N, et al. 2001. Kola alkaline province in the Palaeozoic: Evaluation of primary mantle magma composition and magma generation conditions. Russ J Earth Sci, 3: 1–32

Ashchepkov I V, Pokhilenko N P, Vladykin N V, et al. 2010. Structure and evolution of the lithospheric mantle beneath Siberian Craton, thermobarometric study. Tectonophysics, 485: 17–41

Basu A R, Poreda R J, Renne P R, et al. 1995. High-^{3}He plume origin and temporal-spatial evolution of the Siberian flood basalts. Science, 269: 822–825

Begg G C, Griffin W L, Natapov L M, et al. 2009. The lithospheric architecture of Africa: Seismic tomography, mantle petrology, and tectonic evolution. Geosphere, 5: 23–50

Bell D R, Schmitz M D, Janney P E. 2003. Mesozoic thermal evolution of the southern African lithosphere. Lithos, 71: 273–287
Bird P. 1979. Continental delamination and the Colorado Plateau. J Geophys Res, 84: 7561–7571
Bleeker W. 2003. The late Archean record: A puzzle in ca. 35 pieces. Lithos, 71: 99–134
Boyd F R. 1984. Siberian geotherm based on lherzolite xenoliths from the Udachnaya kimberlite, USSR. Geology, 12: 528–530
Boyd F R, Pokhilenko N P, Pearson D G, et al. 1997. Composition of the Siberian cratonic mantle: Evidence from Udachnaya peridotite xenoliths. Contrib Mineral Petrol, 128: 228–246
Boyd O S, Jones C H, Sheehan A F. 2006. Foundering lithosphere imaged beneath the southern Sierra Nevada, California, USA. Science, 305: 660–662
Campbell I H. 2007. Testing the plume theory. Chem Geol, 241: 153–176
Carlson R W, Pearson D G, James D E. 2005. Physical, chemical, and chronological characteristics of continental mantle. Rev Geophys, 43, doi: 10.1029/2004RG000156
Carlson R W, Irving A J. 1994. Depletion and enrichment history of subcontinental lithospheric mantle: An Os, Sr, Nd and Pb isotopic study of ultramafic xenoliths from the northwestern Wyoming craton. Earth Planet Sci Lett, 126: 457–472
Chalapathi Rao N V, Wu F Y, Mitchell R H, et al. 2013. New Mesoproterozoic U-Pb ages, chemical and Sr-Nd isotopic composition of perovskite from kimberlites of the Eastern Dharwar craton, Southern India: distinct mantle sources and a widespread 1.1 Ga tectonothermal event. Chem Geol, 353: 48–64
Chen L, Wang T, Zhao L, et al. 2008. Distinct lateral variation of lithospheric thickness in the northeastern North China Craton. Earth Planet Sci Lett, 267: 56–68
Cordeiro P F D, Brod J A, Palmieri M, et al. 2011. The Catalao I niobium deposit, central Brazil: Resources, geology and pyrochlore chemistry. Ore Geol Rev, 41: 112–121
Courtillot V, Besse J, Vandamme D, et al. 1986. Deccan flood basalts at the Cretaceous/Tertiary boundary? Earth Planet Sci Lett, 80: 361–374
Courtillot V, Kravchinsky V A, Quidelleur X, et al. 2010. Preliminary dating of the Viluy traps (Eastern Siberia): Eruption at the time of Late Devonian extinction events? Earth Planet Sci Lett, 300: 239–245
Davies G F. 1994. Thermomechanical erosion of the lithosphere by mantle plumes. J Geophys Res, 99: 15709–15722
De Almeida F F M, Neves B B D, Carneiro C D. 2000. The origin and evolution of the South American Platform. Earth-Sci Rev, 50: 77–111
Dessai A G, Markwick A, Vaselli O, et al. 2004. Granulite and pyroxenite xenoliths from the Deccan Trap: Insight into the nature and composition of the lower lithosphere beneath cratonic India. Lithos, 78: 263–290
De Wit M J, Roering C, Hart R J, et al. 1992. Formation of an Archaean continent. Nature, 357: 553–562
Dickinson W R. 2004. Evolution of the north American cordillera. Annu Rev Earth Planet Sci, 32: 13–45
Doucet L S, Ionov D A, Golovin A V. 2013. The origin of coarse garnet peridotites in cratonic lithosphere: New data on xenoliths from the Udachnaya kimberlite, central Siberia. Contrib Mineral Petrol, 165: 1225–1242
Downes H, Balaganskaya E, Beard A, et al. 2005. Petrogenetic processes in the ultramafic, alkaline and carbonatitic magmatism in the Kola alkaline province: A review. Lithos, 85: 48–75
Downes H, MacDonald R, Upton B G J, et al. 2004. Ultramafic xenoliths from the Bearpaw Mountains, Montana, USA: Evidence for multiple metasomatic events in the lithospheric mantle beneath the Wyoming craton. J Petrol, 45: 1631–1662
Ducea M, Saleeby J. 1998. A case for delamination of the deep batholithic crust beneath the Sierra Nevada, California. Int Geol Rev, 40: 78–93
Duebendorfer E M, Houton R S. 1987. Proterozoic accretionary tectonics at the southern margin of the Archean Wyoming Craton. Geol Soc Am Bull, 98: 554–568
Duncan R A, Pyle D G. 1988. Rapid eruption of the Deccan flood basalts at the Cretaceous/Tertiary boundary. Nature, 333: 841–843
Elkins-Tanton L T. 2005. Continental magmatism caused by lithospheric delamination. In: Foulger G R, Natland J H, Presnall D C, et al., eds. Plates, Plumes, and Paradigms. Geol Soc Am Special Paper, 388: 449–461
Ellam R M. 1992. Lithospheric thickness as a control on basalt geochemistry. Geology, 20: 153–156
Fouch M J, James D E, VanDecar J C, et al. 2004. Mantle seismic structure beneath the Kaapvaal and Zimbabwe cratons. S Afr J Geol, 107: 33–44
Frost C D, Frost B R, Chamberlain K R, et al. 1998. The late Archean history of the Wyoming province as recorded by granitic magmatism in the Wind River Range, Wyoming. Precambrian Res, 89: 145–173
Gibson S A, Thompson R N, Leonardos O H, et al. 1995. The Late Cretaceous impact of the Trindade mantle plume: Evidence from large-volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil. J Petrol, 36: 189–229
Gibson S A, Thompson R N, Day J A. 2006. Timescales and mechanisms of plume-lithosphere interactions: $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology and

geochemistry of alkaline igneous rocks from the Paraná-Etendeka large igneous province. Earth Planet Sci Lett, 251: 1–17

Gokarn S G, Gupta G, Rao C K. 2004. Geoelectric structure of the Dharwar craton from magnetotelluric studies: Archean suture identified along the Chitradurga-Gadagschist belt. Geophys J Int, 158: 712–758

Griffin W L, Zhang A D, O'Reilly S Y, et al. 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. In: Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al, eds. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. Am Geophy Union, 27: 107–126

Griffin W L, Ryan C G, Kaminsky F V, et al. 1999. The Siberian lithosphere traverse: Mantle terranes and the assembly of the Siberian Craton. Tectonophysics, 310: 1–35

Griffin W L, Natapov L M, O'Reilly S Y, et al. 2005. The Kharamai kimberlite field, Siberia: Modification of the lithospheric mantle by the Siberian Trap event. Lithos, 81: 167–187

Griffin W L, Kobussen A F, Babu E V, et al. 2009. A translithospheric suture in the vanished 1-Ga lithospheric root of South India: Evidence from contrasting lithosphere sections in the Dharwar Craton. Lithos, 112S: 1109–1119

Guarino V, Wu F Y, Lustrino M, et al. 2013. U-Pb ages, Sr-Nd-isotope geochemistry and petrogenesis of kimberlites, kamafugites and phlogopite-picrites of the Alto Paranaíba Igneous Province, Brazil. Chem Geol, 353: 65–82

Hanson R E, Harmer R E, Blenkinsop T G, et al. 2006. Mesoproterozoic intraplate magmatism in the Kalahari craton: A review. J Afr Earth Sci, 46: 141–167

Harte B. 2010. Diamond formation in the deep mantle: The record of mineral inclusions and their distribution in relation to mantle dehydration zones. Mineral Mag, 74: 189–215

Heaman L M, Machado N. 1992. Timing and origin of Midcontinent Rift alkaline magmatism, North America: Evidence from the Coldwell Complex. Contrib Mineral Petrol, 110: 289–303

Heaman L M, LeCheminant A N. 1993. Paragenesis and U-Pb systematics of baddeleyite (ZrO_2). Chem Geol, 110: 95–126

Heaman L M, LeCheminant A N, Rainbird R H. 1992. Nature and timing of Franklin igneous events, Canada: Implications for a Late Proterozoic mantle plume and the break-up of Laurentia. Earth Planet Sci Lett, 109: 117–131

Heaman L M, Kjarsgaard B A, Creaser R A. 2003. The timing of kimberlite magmatism and implications for diamond exploration: A global perspective. Lithos, 71: 153–184

Heaman L M, Kjarsgaard B A, Creaser R A. 2004. The temporal evolution of North American kimberlites. Lithos, 76: 377–397

Hooper P, Widdowson M, Kelley S. 2009. Tectonic setting and timing of the final Deccan flood basalt eruptions. Geology, 38: 839–842

Howarth G H, Barry P H, Pernet-Fisher J F, et al. 2014. Superplume metasomatism: Evidence from Siberian mantle xenoliths. Lithos, 184/187: 209–224

Ionov D A, Doucet L S, Ashchepkov I V. 2010. Composition of the lithospheric mantle in the Siberian Craton: New constraints from fresh peridotites in the Udachnaya-East kimberlite. J Petrol, 51: 2177–2210

Jourdan F, Feraud G, Bertrand H, et al. 2005. The Karoo large igneous province: Brevity, origin, and relation with mass extinction questioned by new $^{40}Ar/^{39}Ar$ age data. Geology, 33: 745–748

Karmalkar N R, Griffin W L, O'Reilly S Y. 2000. Ultramafic xenoliths from Kutch (NW India): Plume-related mantle samples? Int Geol Rev, 42: 416–444

Karmalkar N R, Duraiswami R A, Chalapathi Rao N V, et al. 2009. Mantle-derived mafic-ultramafic xenoliths and the nature of Indian sub-continental Lithosphere. J Geol Soc India, 73: 657–679

Kiselev S, Vinnik L, Oreshin S, et al. 2008. Lithosphere of the Dharwar craton by joint inversion of P and S receiver functions. Geophys J Int, 173: 1106–1118

King S D, Anderson D L. 1998. Edge-driven convection. Earth Planet Sci Lett, 160: 289–296

Krystopowicz N J, Currie C A. 2013. Crustal eclogitization and lithosphere delamination in orogens. Earth Planet Sci Lett, 361: 195–207

Kumar A, Heaman L M, manikyamba C. 2007a. Mesoproterozoic kimberlites in south India: A possiblr link to ~1.1 Ga global magmatism. Precambrian Res, 154: 192–204

Kumar P, Yuan S, Kumar M R, et al. 2007b. The rapid drift of the Indian tectonic plate. Nature, 449: 894–897

Lee C T, Yin Q Z, Rudnick R L, et al. 2000. Osmium isotopic evidence for Mesozoic removal of lithospheric mantle beneath the Sierra Nevada, California. Science, 289: 1912–1916

Lee C T, Luffi P, Chin E J. 2011. Building and destroying continental mantle. Annu Rev Earth Planet Sci, 39: 59–90

Lenardic A, Moresi L N, Mühlhaus H. 2003. Longevity and stability of cratonic lithosphere: Insights from numerical simulations of coupled mantle convection and continental tectonics. J Geophys Res, 108, doi: 10.1029/2002JB001859

McKenzie D, Bickle M J. 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere. J Petrol, 29: 625–679

Menzies M A, Fan W M, Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobe and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In: Prichard H M, Alabaster T, Harris N B W, et al., eds. Magmatic Processes and Plate Tectonic. Geol Soc Special Publ, 76: 71–81

Morbidelli L, Gomes C B, Beccaluva L, et al. 1995. Mineralogical, petrological and geochemical aspects of alkaline and alkaline-carbonatite association from Brazil. Earth-Sci Rev, 39: 135–168

Mukherjee A B, Biswas S K. 1988. Mantle derived spinel lherzolite xenoliths from the Deccan volcanic province (India): Implications for the thermal structure of the lithosphere underlying the Deccan trap. J Volcan Geotherm Res, 35: 269–276

Nehru C E, Reddy A K. 1989. Ultramafic xenoliths from Wajrakarur kimberlites, India. In: Ross J, Jacques A L, Ferguson J, et al., eds. Kimberlites and Related Rocks, Proceedings of the Fourth International Kimberlite Conference. vol. 2. Geol Soc Australia Special Publ, 14: 745–759

O'Brien H E, Irving A J, McCallum I S, et al. 1995. Stronium, neodymium, and lead isotopic evidence for the interaction of post-subduction asthernospheric potassic mafic magmas of the Highwood Mountains, Montana, USA, with ancient Wyoming craton lithospheric mantle. Geochim Cosmochim Acta, 59: 4539–4556

Pearson D G, Canil D, Shirey S B. 2003. Mantle samples included in volcanic rocks: Xenoliths and diamonds. In: Carlson R W, ed. Treatise on Geochemistry: The Mantle and Core. Amsterdam: Elsevier. 171–276

Peslier A H, Woodland A B, Bell D R, et al. 2009. Olivine water contents in the continental lithosphere and the longevity of cratons. Nature, 467: 78–81

Petitjean S, Rabinowicz M, Grégoire M, et al. 2006. Differences between Archean and Proterozoic lithospheres: Assessment of the possible major role of thermal conductivity. Geochem Geophys Geosyst, 7: Q03021, doi: 10.1029/2005GC001053

Rajesh H M, Mukhopadhyay J, Beukes N J, et al. 2009. Evidence for an early Archaean granite from bastar craton, India. J Geol Soc London, 166: 193–196

Rao K R P, Rao K N, Dhakate M V, et al. 2001. Petrology and mineralogy of mantle xenoliths of Wajrakarur and Narayanpet kimberlite fields, Andhra Pradesh, India. Geol Survey India Special Publ, 58: 577–591

Read G, Grutter H, Winter S, et al. 2004. Stratigraphic relations, kimberlite emplacement and lithospheric thermal evolution, Quirico Basin, Minas Gerais State, Brazil. Lithos, 77: 803–818

Reichow M K, Pringle M S, Al'Mukhamedov A I, et al. 2009. The timing and extent of the eruption of the Siberian Traps large igneous province: Implications for the end-Permian environmental crisis. Earth Planet Sci Lett, 277: 9–20

Renne P R, Zhang Z C, Richards M A, et al. 1995. Synchrony and causal relations between Permian-Triassic boundary crises and Siberian flood volcanism. Science, 269: 1413–1416

Rosen O M, Manakov A V, Serenko V P. 2005. Paleoproterozoic collisional system and diamondiferous lithospheric keel of the Yakutian kimberlite province. Russ Geol Geophys, 46: 1259–1272

Roy S, Rao R. 2000. Heat flow in the Indian Shield. J Geophys Res, 105: 25587–25604

Sarkar D, Chandrakala K, Padmavathi, et al. 2001. Crustal velocity structure of western Dharwar Craton, South India. J Geodyn, 31: 227–241

Sarkar R K, Saha D K. 2006. A note of the lithosphere thickness and heat flow density of the Indian Craton from MAGSAT data. Acta Geophy, 54: 198–204

Saunders A D, England R W, Reichow M K, et al. 2005. A mantle plume origin for the Siberian Traps: Uplift and extension in the West Siberian Basin, Russia. Lithos, 79: 407–424

Schoene B, de Wit M, Bowring S A. 2008. Mesoarchean assembly and stabilization of the eastern Kaapvaal craton: A structural-thermochronological perspective. Tectonics, 27: TC5010, doi: org/10.1029/ 2008TC002267

Sengor A M C. 1999. Continental interiors and cratons: Any relation? Tectonophysics, 305: 1–42

Shalivahan, Bhattacharya B B, Chalapathi Rao N V, et al. 2014. Thin lithosphere-asthenosphere boundary beneath Eastern Indian craton. Tectonophysics, 612/613: 128–133

Sleep N H. 2005. Evolution of the continental lithosphere. Annu Rev Earth Planet Sci, 33: 369–393

Sonder L J, Jones C H. 1999. Western United States extension: How the West was widened. Annu Rev Earth Planet Sci, 27: 417–462

Sun J, Liu C Z, Tappe S, et al. 2014. Repeated kimberlite magmatism beneath Yakutia and its relationship to Siberian flood volcanism: Insights from *in situ* U-Pb and Sr-Nd perovskite isotope analysis. Earth Planet Sci Lett, 404: 283–295

Svensen H, Corfu F, Polteau S, et al. 2012. Rapid magma emplacement in the Karoo large igneous province. Earth Planet Sci Lett, 325/326: 1–9

Taylor L A, Snyder G A, Keller R, et al. 2003. Petrogenesis of group A eclogites and websterites: Evidence from the Obnazhennaya kimberlite, Yakutia. Contrib Mineral Petrol, 145: 424–443

Torsvik T H, Burke K, Steinberger B, et al. 2010. Diamonds sampled by plumes from the core-mantle boundary. Nature, 466: 352–355

Tychkov N S, Pokhilenko N P, Kuligin S S, et al. 2008. Composition and origin of peculiar pyropes from lherzolites: Evidence for the evolution of the lithospheric mantle of the Siberian Platform. Russ Geol Geophys, 49: 225–239

Ulbrich H H G J, Gomes C B. 1981. Alkaline rocks from continental Brazil. Earth-Sci Rev, 17: 135–154

Walter M J, Kohn S C, Araujo D, et al. 2011. Deep mantle recycling of oceanic crust: Evidenc from diamonds and their mineral inclusions. Science, 334: 54–57

Wang T, Guo L, Zheng Y D, et al. 2012. Timing and processes of late Mesozoic mid-lower-crustal extension in continental NE Asia and implications for the tectonic setting of the destruction of the North China Craton: Mainly constrained by zircon U-Pb ages from metamorphic core complexes. Lithos, 154: 315–345

Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, et al. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. Earth Planet Sci Lett, 233: 103–119

Wu F Y, Yang Y H, Li Q L, et al. 2011. *In situ* determination of U-Pb ages and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the petrogenesis of the Phalaborwa carbonatite Complex, South Africa. Lithos, 127: 309–322

Wu F Y, Mitchell R H, Li Q L, et al. 2013a. *In situ* U-Pb age determination and Sr-Nd isotopic analyses of perovskite from the Premier (Cullinan) kimberlite, South Africa. Chem Geol, 353: 83–95

Wu F Y, Arzamastsev A A, Mitchell R H, et al. 2013b. Emplacement age and Sr-Nd isotopic compositions of the Afrikanda alkaline ultramafic complex, Kola Peninsula, Russia. Chem Geol, 353: 210–229

Xia Q K, Hao Y T, Li P, et al. 2010. Low water content of the Cenozoic lithospheric mantle beneath the eastern part of the North China Craton. J Geophys Res, 115: B07207, doi: 10.1029/2009JB006694

Xia Q K, Liu J, Liu S C, et al. 2013. High water content in Mesozoic primitive basalts of the North China Craton and implications on the destruction of cratonic mantle lithosphere. Earth Planet Sci Lett, 361: 85–97

Xu Y G, He B, Chung S L, et al. 2004. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flodd-basalt province. Geology, 32: 917–920

Xu Y G, Wei X, Luo Z Y, et al. 2014. The Early Permian Tarim Large Igneous Province: Main characteristics and a plume incubation model. Lithos, 204: 20–35

Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, et al. 2008. Mesozoic decratonization of the North China block. Geology, 36: 467–470

Yang Y H, Wu F Y, Wilde S A, et al. 2009. *In-situ* perovskite Sr-Nd isotopic constraints on the petrogenesis of the Ordovician Mengyin kimberlites in the North China Craton. Chem Geol, 264: 24–42

Yuen D A, Fleitout L. 1985. Thinning of the lithosphere by small-scale convective destabilizaion. Nature, 313: 125–128

Zandt G, Gilbert H, Owens T J, et al. 2004. Active foundering of a continental arc root beneath the Southern Sierra Nevada, California. Nature, 431: 41–46

Zhang J J, Zheng Y F, Zhao Z F. 2009. Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric mantle in the origin of Cenozoic continental basalts in east-central China. Lithos, 110: 305–326

Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A. 2002. Review of global 2.1–1.8 Ga orogens: Implications for a pre-Rodinia supercontinent. Earth Sci Rev, 59: 125–162

Zhao G C, Sun, M, Wilde S A. 2003. Correlations between the Eastern Block of the North China Craton and the South Indian Block of the Indian Shield: An Archean to Paleoproterozoic link. Precambrian Res, 122: 201–233