



进展

华北克拉通破坏的时间、范围与机制

朱日祥^{①*}, 陈凌^①, 吴福元^①, 刘俊来^②

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 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

* E-mail: rxzhu@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2011-03-09; 接受日期: 2011-03-20

国家自然科学基金重大研究计划项目(批准号: 90814000, 90814002)资助

摘要 华北是全球古老克拉通遭受破坏最明显和最典型的地区. 自国家自然科学基金委员会设立“华北克拉通破坏”研究计划以来, 通过不同学科间的有效交叉融合, 围绕该克拉通破坏的时间、范围和机制等重要科学问题, 进行了大量的工作, 并取得了诸多新认识. 太行山东西两侧地壳与岩石圈厚度空间变化以及地球化学属性的异同显示, 华北克拉通破坏主要集中在东部, 而西部主要表现为克拉通的改造. 克拉通化之后的沉积建造、岩浆活动和构造变形等特征表明, 克拉通破坏发生在中生代, 其峰期为 125 Ma 左右. 通过对比发现, 岩石圈减薄在全球其他克拉通中也多有发生, 但大多并不伴随克拉通的破坏; 只有当受到大洋板块俯冲作用的强烈影响时, 克拉通破坏才有可能发生. 具体到华北地区, 在早白垩世全球地幔整体升温背景下, 太平洋板块的俯冲使华北克拉通东部地幔对流系统失稳, 导致了华北克拉通东部破坏; 岩石圈拆沉或热-化学/机械侵蚀是地幔对流失稳所产生的不同表现形式.

关键词时间、范围和机制
克拉通破坏
华北

克拉通是地球表层的重要组成单元, 占地球陆地面积的 50% 左右^[1]. 它主要形成于前寒武纪(>5.4 亿年), 特别是早前寒武纪(>18 亿年). 典型的克拉通具有厚度约为 200 km 的岩石圈, 而且密度和热流值较低、刚性较高, 所以克拉通具有免遭后期地质作用改造的能力^[2], 表现在其形成后, 无明显的壳内韧性变形和岩浆活动, 其上覆沉积盖层呈近水平状产出; 现今也无明显地震活动, 从而成为地球上最稳定的地区. 正是由于这种稳定性, 克拉通保留了目前地球上最古老的物质(44 亿年)和最完整的地质历史记录^[3], 成为有地质学以来研究大陆形成与演化最重要的地区.

华北克拉通自 18 亿年克拉通化之后至早中生代, 一直保持相对稳定, 并保存有巨厚的太古宙岩石圈根^[4-6]. 但自中生代以来, 华北克拉通, 特别是其东部, 发生了大规模的构造变形和岩浆活动, 形成多种类型的盆地, 伴随产生了大量的金属矿产和油气资源^[7]. 20 世纪初, 翁文灏先生^[8]根据我国东部晚中生代构造-岩浆(火山)活动情况, 提出了“燕山运动”的概念; 随后, 陈国达先生^[9]提出了“地台活化”的观点. 20 世纪 90 年代, 中外科学家根据对华北克拉通的研究, 提出了“岩石圈减薄”^[10,11]或“去根”的概念^[12]. 随着研究的深入, 人们逐步认识到华北克拉通东部不仅发生了 100 多公里岩石圈地幔的丢失^[11,13], 而且岩

石圈地幔物理化学性质发生了根本性的改变^[14-18]. 更为重要的是, 华北克拉通应该具有的稳定性遭到破坏, 如原本稳定的地壳发生了大规模韧性变形和岩浆-成矿活动. 我们将这种克拉通稳定性整体丧失的地质现象称之为克拉通破坏^[19]或去克拉通化^[20]. 很显然, “岩石圈减薄”只是华北克拉通演化的表象之一, 而“克拉通破坏”才是其演化的本质所在.

稳定的大陆克拉通遭到破坏或改造还是人类认知中认识相当有限的一种地质现象, 对该现象的探索可望成为打开大陆地质之门的钥匙, 为认识大陆的形成演化及其效应、构筑更完善的地球形成与演化理论体系提供新的突破口. 国家自然科学基金委员会部署实施了“华北克拉通破坏”重大研究计划, 集中我国在地球科学、数理科学和信息科学等领域的优势研究力量, 突破传统学科界线的束缚, 进行了不同学科间的有效交叉融合, 围绕“华北克拉通破坏”这一核心科学问题, 在大陆形成演化等基础性和前瞻性研究领域取得了重要进展, 为我国的地球科学做出了突出贡献.

1 华北克拉通破坏的时代

华北克拉通在古元古代晚期形成后, 直到早中生代保持其基本稳定的特征, 沉积了巨厚的浅海相碎屑岩与碳酸岩. 尽管在此之前曾遭受了多期程度不同的改造作用, 但这些并没有彻底改变其克拉通整体稳定性的基本属性^[21]. 比如, 在中元古代时期, 华北陆块内部和边缘发育大量狭长的裂陷槽, 形成巨厚的海相沉积组合, 其中尤以燕辽、白云鄂博-狼山、熊耳-吕梁裂陷槽最为典型. 这一时期, 华北还发育典型的非造山型岩浆活动, 如大洪峪组富钾火山岩、密云环斑花岗岩、大庙斜长岩和下马岭期基性岩墙群等^[22,23]. 早古生代(~4.8 亿年), 华北克拉通东部含金刚石金伯利岩(山东蒙阴和辽宁复县)的喷发及其捕获的地幔包体说明当时华北克拉通岩石圈的厚度约为 200 km^[4,5]. 几乎与金伯利岩岩浆喷发同时, 华北克拉通结束了早寒武世以来大面积发育的浅海相碳酸盐岩沉积, 开始了长达 1.5 亿年的剥露历史, 并进而在早-中石炭世开始接受新的海陆交互相沉积, 至早三叠世结束. 晚古生代华北克拉通北部古亚洲洋的俯冲以及早中生代华南大陆与华北克拉通的碰撞拼合, 都对华北克拉通北南边缘甚至内部的演化

产生了影响, 但这些事件对华北克拉通的改造只是局部的, 并不代表华北克拉通整体破坏的开始. 晚中生代古太平洋板块俯冲作用以及蒙古-鄂霍次海的闭合导致华北克拉通动力学体制发生重大转折, 即由早中生代的南北向收缩或挤压转变为与古太平洋板块俯冲相关的近东西向(NWW-SEE 向)的板内变形与伸展^[21]; 正是这次重大动力学体制转折导致华北克拉通东部的破坏, 并在早白垩世(~125 Ma)达到峰期^[24].

华北克拉通破坏的重要标志是岩石圈减薄、地幔性质转变以及壳内大规模韧性变形与岩浆活动, 特别是在早白垩世出现大量伸展构造(包括变质核杂岩、拆离断层和断陷盆地)以及与之相伴的岩浆活动和岩石圈地幔物性的改变. 变质核杂岩构造是地壳强烈伸展并使中下地壳物质直接剥露至地表的典型构造样式, 它在华北克拉通内多处存在, 从西北的呼和浩特变质核杂岩、到中部的京北云蒙山变质核杂岩、再到东部医巫闾山(瓦子峪)和辽南变质核杂岩以及南缘发育的小秦岭变质核杂岩等. 这些伸展构造的最大特点是其发育的近乎等时性(135~115 Ma)和运动方向的一致性(NWW-SEE 向)^[25-27]. 与之相伴, 华北克拉通还发育了一系列规模和尺度各异的断陷盆地(如承德盆地、阜新盆地、胶莱盆地、合肥盆地等)或盆地群(如辽西盆地群、辽东半岛盆地群等); 这些盆地或盆地群的共性在于普遍受伸展正断层控制, 尽管控盆断裂延伸方向不同, 但其下盘或上盘的运动方向基本一致. 值得注意的是, 早白垩世的伸展构造不仅仅局限于华北克拉通, 在我国东北和华南, 甚至蒙古东部和俄罗斯贝加尔湖地区均发育具有相同特点的伸展构造. 早白垩世华北克拉通破坏峰期之后, 华北陆块东部已不再具有典型克拉通的属性, 表现形式之一是板内区域性旋转运动^[28-30]; 变质核杂岩构造分析也揭示了华北克拉通东部区域性旋转运动与伸展构造存在时空耦合关系^[25].

2 华北克拉通破坏的空间分布

华北克拉通破坏的空间分布, 是深入研究该破坏作用动力学过程和机制的重要依据, 而认识地壳和岩石圈结构性质是理解上述克拉通破坏空间分布的有效途径. 对华北克拉通破坏的早期认识主要来自对古生代金伯利岩和中新生代玄武岩及其地幔包

体的岩石-地球化学研究, 由于地幔包体和岩浆岩空间分布的局限性, 对于缺乏岩石出露的沉积盆地和植被等覆盖区, 岩石学和地球化学方法在判断克拉通属性时往往会遇到困难. 近年来在华北地区开展的大规模宽频带流动地震台阵观测(图 1)为从大区域获得华北克拉通破坏空间分布特征提供了科学依据.

利用密集台阵资料获得的最新地震学成像结果显示^[31~40], 华北克拉通现今地壳和岩石圈厚度存在明显的区域差异(图 2). 克拉通东部普遍分布着薄的地壳(<35 km)和岩石圈(60~100 km), 其中地壳厚度横向变化不明显, 而岩石圈厚度则从东南边缘郯庐断裂带的 60~70 km 向西北内部逐渐增加至 90~100 km. 与东部相比, 华北克拉通中-西部地壳明显较厚, 一般在 40~60 km 范围变化, 且大多与地形起伏成镜像关系; 中-西部岩石圈厚度显示出强烈的横向非均匀性, 即在稳定的鄂尔多斯盆地之下保留着约 200 km 的“厚岩石圈”, 而在环鄂尔多斯的新生代银川-河套和汾渭裂陷区则为约 80 km 厚的“薄岩石圈”, 且横向变化大(图 2). 需要特别指出的是, 地壳和岩石圈厚度在克拉通东部与中部边界附近的显著变化, 与南北重力梯度带和地形的突然改变密切相关(图 2).

这些观测结果, 结合华北克拉通东部新生代相对饱满的岩石圈地幔特征和壳源岩浆岩的广泛分布^[5,13,14,24,41], 清楚地表明华北克拉通东部曾经历了岩石圈地幔的整体性破坏以及地壳的强烈改造和减薄作用(主要是下地壳). 因此, 现今华北克拉通岩石圈地幔具有新生岩石圈地幔的性质, 地壳则是前寒武纪与显生宙地壳的“混合型”(或称其为古老克拉通地壳的改造型).

华北克拉通中-西部主体为“厚岩石圈”与局部“薄岩石圈”的观测结果说明, 华北克拉通中-西部地区并没有被破坏, 即还保留着克拉通整体稳定的属性, 仅发生了局部岩石圈改造或减薄. 这一深部特征的浅表响应是中-西部地区较低的地表热流和构造稳定性, 以及局部的中生代-新生代岩浆活动. 综上所述, 我们将克拉通整体稳定属性未变、而其地壳或岩石圈地幔结构和/或性质只发生局部变化的现象定义为克拉通改造.

3 华北克拉通破坏的深部动力学

深部地幔是克拉通破坏的重要动力来源, 问题

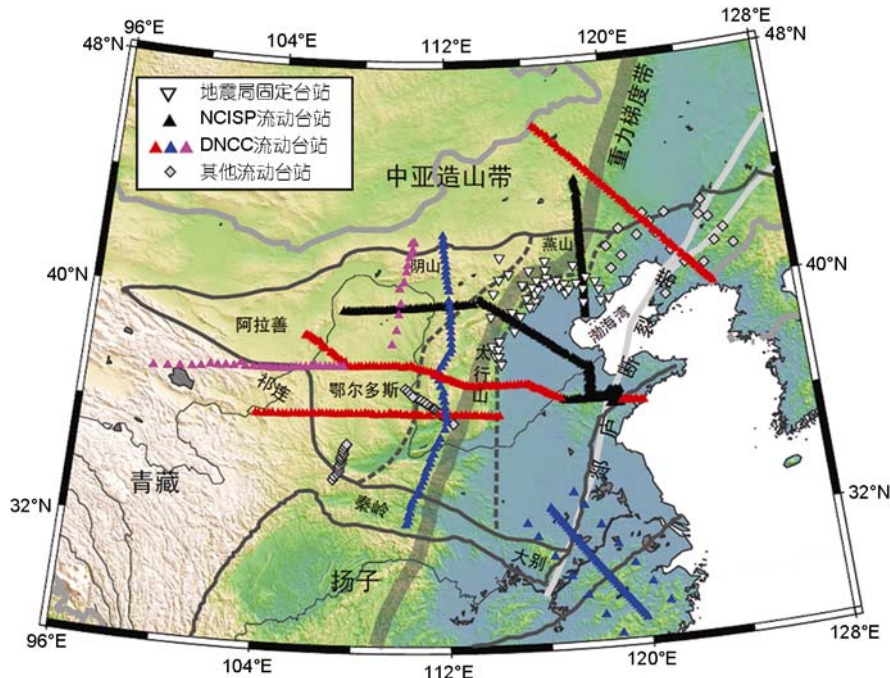


图 1 华北克拉通流动地震台阵分布

NCISP, 华北内部结构计划; DNCC, 华北克拉通破坏计划. 紫色三角表示观测尚未结束的流动地震台站

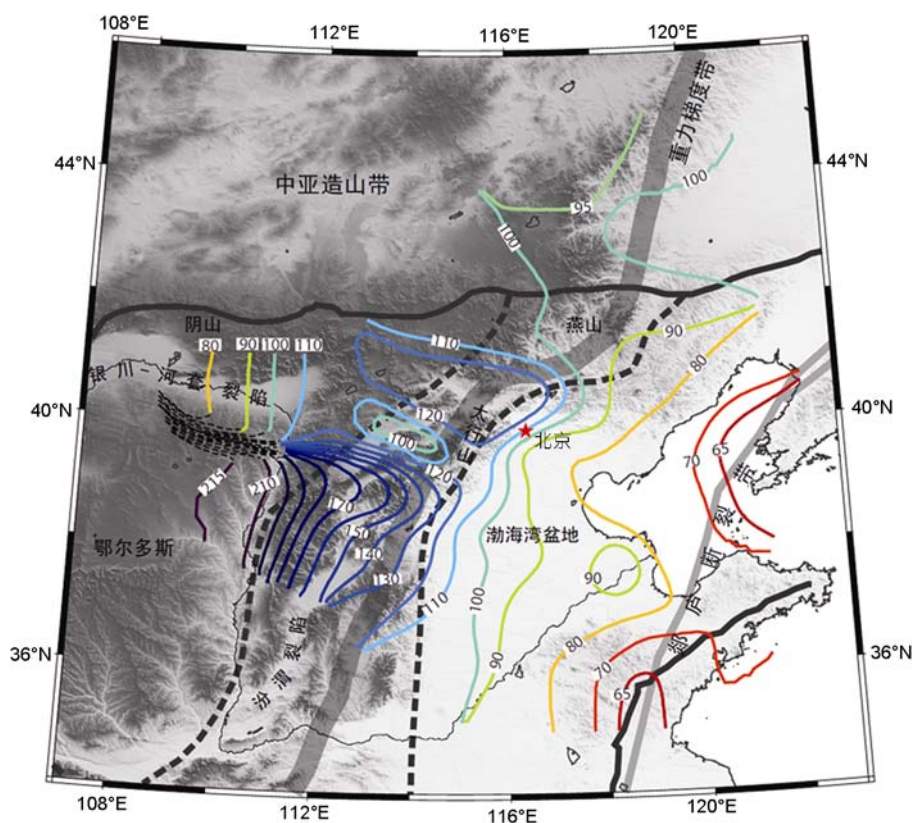


图2 华北克拉通岩石圈厚度等值线图

据文献[37~40]改编. 等值线上的数字表示岩石圈厚度值, 鄂尔多斯北部的虚线为根据文献[40]推测的结果

是我们如何去理解这一过程. 我们知道, 地球内部间断面的结构与性质是制约地球动力学的关键因素. 因此, 对华北克拉通破坏深部过程的研究需要从认识深部间断面的结构与性质入手. 通过分析研究密集流动地震台阵资料获得的华北克拉通地幔过渡带结构图像^[42~45], 揭示了地幔过渡带的厚度在华北克拉通东部和中部边界附近发生显著变化, 与此相伴随的是地幔过渡带底部(~660 km 间断面)结构与物性的明显横向变化(图 3(a)). 结合矿物物理实验研究^[47~49], 华北克拉通东部较厚的地幔过渡带(>250 km) 和中-西部偏薄的地幔过渡带(≤250 km)与区域地震层析成像显示的高速(低温)太平洋俯冲板块滞留在中国东部地幔过渡带、其前缘未超过太行山一线的图像^[46](图 3(b))相吻合, 并分别对应于华北克拉通东部的整体破坏和中-西部局部岩石圈改造或减薄(图 2, 3(c)).

华北克拉通东部和中-西部地幔过渡带厚度还有

两方面的特征值得注意: 其一, 在岩石圈被整体破坏的东部和局部被改造或减薄的西部地区, 地幔过渡带厚度变化是不同的(图 3(a), (c)); 比如, 在中-西部岩石圈被减薄到约 80 km 的汾渭裂陷和银川-河套裂陷区, 地幔过渡带也比较薄, 厚度大多在 245 km 以下, 尤其是岩石圈相对更薄的银川-河套裂陷之下, 地幔过渡带甚至不足 240 km. 因此, 岩石圈被减薄的环鄂尔多斯裂陷区对应的是相对“薄的地幔过渡带”, 而岩石圈被整体破坏的华北克拉通东部对应的是相对“厚的地幔过渡带”. 其二, 克拉通东部岩石圈和地幔过渡带厚度的横向变化幅度大致相当(都为 30~40 km), 而中-西部岩石圈厚薄差异非常显著(>100 km, 图 2), 但地幔过渡带厚度变化则相对平缓(<15 km, 图 3(a), (c)). 这些差异特征进一步表明, 华北克拉通中-西部与东部经历的地幔动力学过程具有明显的差异, 正是这种差异造成克拉通东部整体被破坏, 而中-西部仅仅是岩石圈的局部改造或减薄.

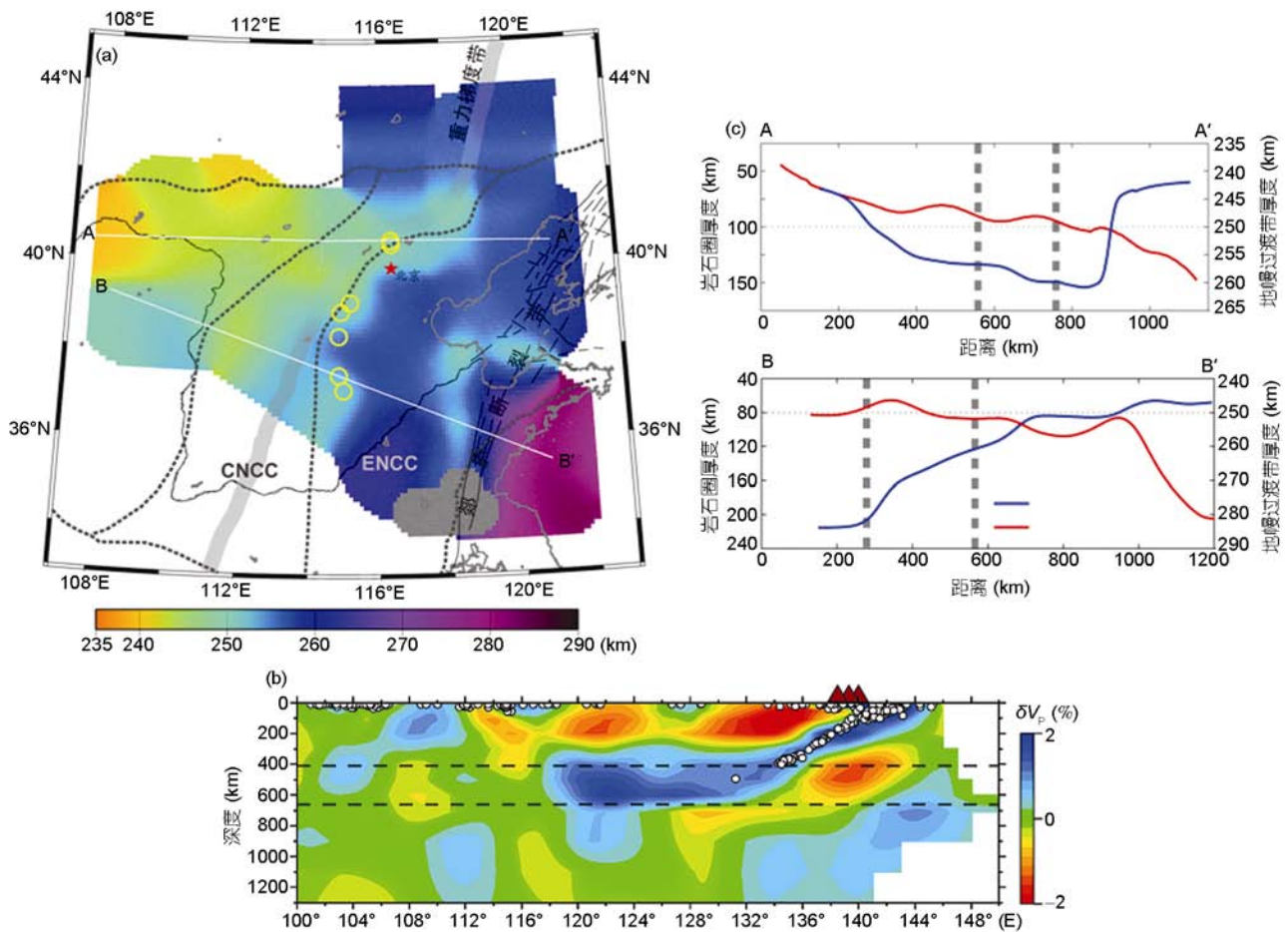


图3 华北克拉通地幔过渡带结构

(a) 地幔过渡带厚度分布图^[44]; 其中黄色圆圈代表地幔过渡带厚度和 660 km 间断面结构都发生明显变化的位置; (b) 沿 37°N 的 E-W 向 P 波速度扰动剖面^[46]; (c) 沿 A-A' 和 B-B' 剖面地幔过渡带厚度与岩石圈厚度的横向变化对比

4 华北克拉通破坏机制

对于华北克拉通破坏机制, 一直存在很大争议. 我们重申, 垂向上的岩石圈减薄不等于破坏, 就像水平方向上的大陆裂解一样, 也不是破坏. 从动力学角度来看, 造成岩石圈强烈改造、减薄和破坏的原因不外乎两个, 即板块运动引起的板缘作用和深部地幔动力施加的板下作用. 这两者究竟哪种作用在华北克拉通破坏过程中扮演了更为重要的角色呢? 对于这一问题, 需要从不断积累的观测和实验数据中寻求答案, 也需要我们从全球的角度来认识.

目前, 全球主要的克拉通有南非、西伯利亚、北美、南美、东欧、澳大利亚和南极等. 通过分析已有资料, 我们发现除资料较少的南极克拉通情况不明

外, 上述克拉通中只有南非克拉通没有岩石圈明显减薄的证据. 岩石圈减薄最具代表性的例子是印度克拉通, 它的岩石圈厚度从 11 亿年前约 200 km 变化到现在的不足 100 km^[50,51]. 因此, 我们说克拉通岩石圈减薄是较为常见的地质事件, 并非华北克拉通独有. 对全球克拉通资料更详尽的总结发现, 上述岩石圈减薄主要与地幔热柱活动有关. 如印度克拉通的减薄就与导致 65 Ma 德干玄武岩喷发的 Reunion 地幔柱有关^[52]. 然而上述克拉通岩石圈尽管普遍发生了减薄, 但大多仍然保留其克拉通整体稳定的基本属性, 没有出现强烈的壳内韧性变形与岩浆活动等地质事件. 例如印度克拉通, 其 65 Ma 喷发的德干玄武岩目前仍呈水平状产出, 现今也无明显的大地震活动. 也就是说, 克拉通岩石圈减薄并不一定伴随克拉

通破坏; 如果再考虑到南非、西伯利亚、北美、南美等克拉通下方曾有过超级地幔柱活动、而这些克拉通仍保持稳定未被破坏的事实^[53,54], 我们认为, 地幔柱有可能使克拉通岩石圈减薄, 但不能使其破坏。大陆岩石圈稳定性模拟研究^[55,56]也表明, 典型克拉通岩石圈底部的热-机械侵蚀作用是较为有限的, 即使直接位于超级地幔柱之上并与其发生相互作用, 克拉通岩石圈地幔根也需要大约 2 亿年以上的时间才能被显著侵蚀减薄^[57], 更不用说克拉通的破坏。

排除了地幔深部运动施加的板下作用, 我们可以推论, 克拉通破坏可能更多地与板缘作用有关, 这在北美克拉通表现最为明显。研究发现, 由于太平洋板块的俯冲作用触发了地幔的非稳态流动, 致使该克拉通西缘岩石圈不仅减薄, 而且被破坏了^[58-60]; 同样, 现有的各种观测资料表明, 中生代以来太平洋板块向东亚大陆的持续俯冲所引发的非稳态地幔流动对华北克拉通东部的整体性破坏起了重要作用^[13,24,36,61]。这一结论首先来自太平洋俯冲事件与华北克拉通破坏在时间和空间上的相关性。从时间上来说, 华北东部大规模岩浆活动^[24]、区域性构造伸展^[25,26,62]和大规模成矿^[7,63]等均是反映岩石圈减薄和破坏的地质现象, 与太平洋板块生长速率显著增加和俯冲方向突然变化的时间相对应^[63,64]。从空间上来说, 南北重力梯度带和郯庐断裂带两条中国东部大型构造带的走向(图 1), 也都显示出与太平洋板块俯冲的相关性。新的地震学研究揭示, 华北克拉通东部的破坏与这些浅表地质特征和太平洋板块在地幔过渡带的滞留具有对应性(图 2, 3)。这反映了太平洋板块俯冲过程对东部地区从地表到上地幔以及地幔过渡带的结构与物性都产生了强烈影响, 导致华北克拉通下方产生不稳定的地幔流动体系, 造成过渡带间断面形态的高度不均匀, 引起上地幔减压熔融或地幔物质沿着克拉通根向上流动和停滞在过渡带的俯冲板块部分沉入下地幔^[45]。另一方面, 上述不稳定的地幔流动体系及太平洋板块的俯冲还引起弧后拉张作用, 导致华北克拉通东部普遍发育 NWW-SEE 向伸展构造。在这样的动力背景和非稳态地幔流动体系共同作用下, 早白垩世(130~120 Ma)华北克拉通东部岩浆活动达到高峰。由此可见, 华北克拉通东部整体性的破坏与太平洋板块俯冲引起的地幔不均一流动密切相关。

太平洋板块俯冲之所以有别于华北克拉通所经

历的其他板块俯冲事件(如晚古生代古亚洲洋向华北的俯冲、早中生代扬子向华北的俯冲等), 除了太平洋板块本身的特征和俯冲历史之外, 还与晚中生代全球构造背景有关。在早白垩纪, 太平洋超级地幔柱的上升与特提斯洋关闭相关的地幔雪崩事件以及冈瓦纳大陆的裂解事件等使太平洋板块俯冲加速, 并引起其俯冲方向和速率的显著改变^[24,63,65-68]。大洋板块的快速俯冲与白垩纪全球地幔的整体明显升温^[69], 增强了流体交代、熔融作用和岩浆活动, 触发了俯冲带及其邻近区域地幔流动非稳态的出现, 导致上覆岩石圈地幔弱化; 同时, 非稳态地幔流动进一步促使克拉通内力学薄弱带发生构造活化, 从而更有利于岩石圈的弱化和破坏(图 4)。上述作用必然造成岩石圈底部热-机械-化学侵蚀效率的显著提高, 并进一步加速重力失稳和下地壳与岩石圈地幔拆沉等克拉通不同破坏方式的发生。

以上论证了太平洋板块俯冲导致的地幔非稳态流动是华北克拉通东部破坏的主因, 那么华北克拉通中-西部岩石圈局部改造或减薄的动力又来自何处? 如前所述, 中-西部地区以 >100 km 的小尺度岩石圈厚薄差异和 <15 km 的地幔过渡带厚度平缓变化为特征。如果仅考虑温度因素, 根据矿物物理实验结果, <15 km 的地幔过渡带厚度差异对应于不到 100°C 的温度异常^[70]。显然, 中-西部强烈的岩石圈厚度变化不可能完全由这一弱温度异常及其所对应的现今深部地幔过程来解释。该地区岩石圈显著减薄的两个新生代裂隙区都对应于早先存在于克拉通的古元古代构造带^[40,71]。相对于太古代克拉通的核心部分, 这些古老构造带强度相对较弱, 更易于受到后期构造事件的影响。因此, 华北克拉通中-西部岩石圈局部改造或减薄与其早期本身的不均一性有关。其中强度较低的活动构造带在后期的热-构造事件过程中, 较易成为受热更强烈和应变更集中的区域^[72,73], 从而其岩石圈较易受到改造、弱化和减薄。这种作用也使活动构造带对邻近的克拉通核心地区起到构造缓冲和保护作用, 并进一步导致中-西部地区长期稳定的鄂尔多斯与环鄂尔多斯活动带之间岩石圈结构存在强烈的差异性^[40,71]。事实上, 与华北中-西部类似的克拉通岩石圈局部改造或减薄, 以及克拉通核心区与周边活动带壳幔结构的强烈差异, 在南非^[74]、欧洲^[75]、西伯利亚^[76]、东非^[77]、北美^[78,79]等克拉通都被普遍观测到, 而活动构造带对邻近克拉通的缓

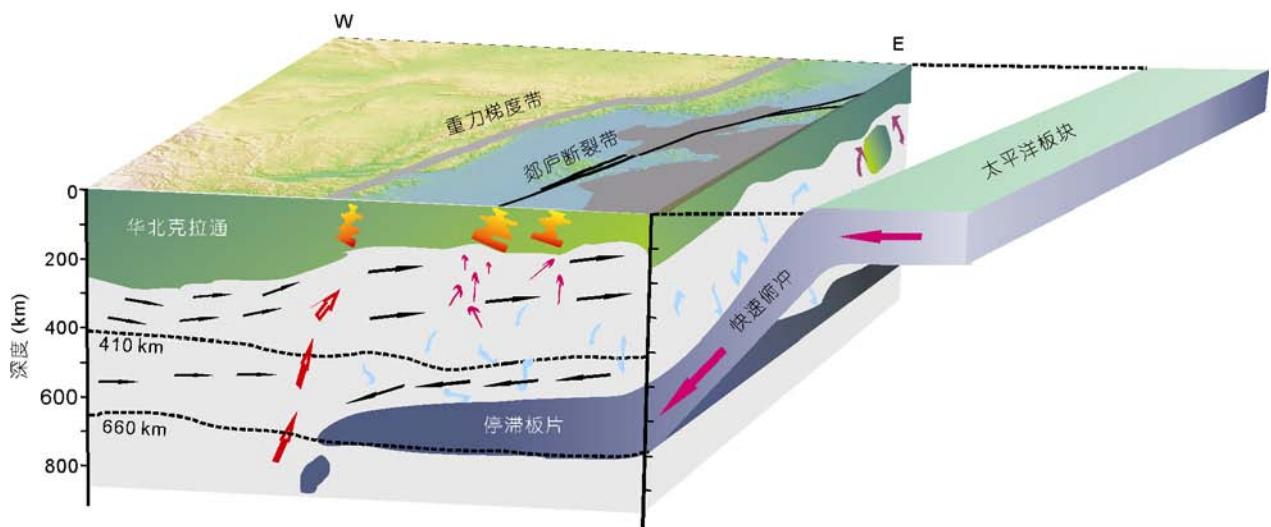


图 4 华北克拉通破坏与改造的地幔对流机制

冲和保护作用也被地幔动力学数值模拟研究所证实^[80], 成为克拉通能够长期稳定的一个重要因素. 基于上述分析可知, 晚古生代古亚洲洋向华北的俯冲、早中生代扬子向华北的俯冲甚至印度板块向欧亚大陆的俯冲等地质事件都会引起华北克拉通中-西部构造薄弱带局部改造或岩石圈减薄, 但不会造成西部克拉通整体稳定属性的改变.

5 结语

新的研究表明, 华北克拉通破坏不是一个特殊的地质现象, 而是特定构造环境下大陆岩石圈

演化的产物. 对华北克拉通破坏的研究意义, 不仅在于它的东部破坏程度明显超过世界上其他的克拉通^[19], 成为古老克拉通遭受破坏的最典型地区^[81], 还在于它的中-西部岩石圈局部改造或减薄可能还反映了克拉通演化过程中另一个更为普遍的现象和规律. 所以说, 华北克拉通破坏所蕴含的丰富地质内涵使它成为探索大陆动力学的极佳场所. 因此, 继续加强对华北克拉通破坏的研究, 并将其置于全球构造背景下, 从区域差异性和共性角度进一步认识大陆的稳定与破坏以及大陆形成和演化规律, 是中国科学家能够为全球地球科学事业做出突出贡献的重要突破口.

致谢 两位审稿专家提出了宝贵的修改意见和建议, 谨表谢忱.

参考文献

- 1 Rudnick R L, Fountain D M. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Rev Geophys*, 1995, 33: 267–309
- 2 Pearson D G. The age of continental roots. *Lithos*, 1999, 48: 171–194
- 3 Wilde S A, Valley J W, Peck W H, et al. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, 2001, 409: 175–178
- 4 池际尚, 路凤香. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征. 北京: 科学出版社, 1996. 292
- 5 Xu Y G. Thermo-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism. *Phys Chem Earth*, 2001, 26: 747–757
- 6 Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, et al. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 198: 307–322
- 7 Yang J H, Wu F Y, Wilde S A. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: An association with lithospheric thinning. *Ore Geol Rev*, 2003, 23: 125–152

- 8 翁文灏. 中国东部中生代以来之地壳运动及火山活动. 中国地质学会志, 1927, 6: 9–37
- 9 陈国达. 中国地台“活化区”的实例并着重讨论华夏古陆问题. 地质学报, 1956, 36: 239–272
- 10 范蔚茗, Menzies M A. 中国东部古老岩石圈下部的破坏与软流圈地幔的增生. 大地构造与成矿学, 1992, 16: 171–180
- 11 Menzies M A, Fan W M, Zhang M. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean Craton, China. In: Prichard H M, Alabaster T, Harris N B W, et al, eds. Magmatic Processes and Plate Tectonics. Geol Soc Special Publ, 1993, 76: 71–78
- 12 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化”. 现代地质, 1994, 8: 349–356
- 13 Griffin W L, Zhang A D, O'Reilly S Y, et al. 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 Geophys Union Geodyn Ser, 1998, 27: 107–126
- 14 Fan W M, Zhang H F, Baker J, et al. On and off the North China Craton: Where is the Archaean keel? J Petrol, 2000, 41: 933–950
- 15 Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W. Relict refractory mantle beneath the eastern North China Block: Significance for lithosphere evolution. Lithos, 2001, 57: 43–66
- 16 Rudnick R L, Gao S, Ling W L, et al. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China Craton. Lithos, 2004, 77: 609–637
- 17 Zhang H F. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: A case of Sino-Korean Craton. Earth Planet Sci Lett, 2005, 237: 768–780
- 18 Ying J F, Zhang H F, Kita N, et al. Nature and evolution of Late Cretaceous lithospheric mantle beneath the eastern North China Craton: Constraints from petrology and geochemistry of peridotitic xenoliths from Junan, Shandong Province, China. Earth Planet Sci Lett, 2006, 244: 622–638
- 19 吴福元, 徐义刚, 高山, 等. 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, 2008, 24: 1145–1174
- 20 Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, et al. Mesozoic decratonization of the North China Block. Geology, 2008, 36: 467–470
- 21 赵越, 陈斌, 张拴宏, 等. 华北克拉通北缘及邻区前燕山期主要地质事件. 中国地质, 2010, 37: 900–915
- 22 李怀坤, 陆松年, 李惠民, 等. 侵入下马岭组的基性岩床的锆石及斜锆石 U-Pb 精确定年. 地质通报, 2009, 28: 1396–1404
- 23 Zhang S H, Zhao Y, Yang Z Y, et al. The 1.35 Ga diabase sills from the northern North China Craton: Implications for breakup of the Columbia (Nuna) supercontinent. Earth Planet Sci Lett, 2009, 288: 588–600
- 24 Wu F Y, Lin J Q, Simon A W, et al. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. Earth Planet Sci Lett, 2005, 233: 103–119
- 25 Liu J L, Davis G A, Lin Z Y, et al. The Liaonan metamorphic core complex, Southeastern Liaoning Province, North China: A likely contributor to Cretaceous rotation of Eastern Liaoning, Korea and contiguous areas. Tectonophysics, 2005, 407: 65–80
- 26 Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al. Rapid exhumation and cooling of the Liaonan metamorphic core complex: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology and implications for Late Mesozoic extension in the eastern North China Craton. Geol Soc Am Bull, 2007, 119: 1405–1414
- 27 Lin W, Faure M, Monie P, et al. Mesozoic extensional tectonics in Eastern margin of Eurasia Continent, the case study of South-Liaodong peninsula dome, NE China. J Geol, 2008, 116: 134–154
- 28 朱日祥, 邵济安, 潘永信, 等. 辽西白垩纪火山岩古地磁测定与陆内旋转运动. 科学通报, 2002, 47: 1335–1340
- 29 Lin W, Chen Y, Faure M, et al. Tectonic implications of new Late Cretaceous paleomagnetic constraints from East Liaoning Peninsula, NE China. J Geophys Res, 2003, 108(B6): 2313, doi: 10.1029/2002JB002169
- 30 Huang B C, Piper J D A, Zhang C X, et al. Paleomagnetism of Cretaceous rocks in the Jiaodong Peninsula, eastern China: Insight into block rotations and neotectonic deformation in eastern Asia. J Geophys Res, 2007, 112: B03106, doi: 10.1029/2006JB004462
- 31 Zheng T, Chen L, Zhao L, et al. Crust-mantle structure difference across the gravity gradient zone in North China Craton: Seismic image of the thinned continental crust. Phys Earth Planet Inter, 2006, 159: 43–58
- 32 Zheng T Y, Chen L, Zhao L, et al. Crustal structure across the Yanshan Belt at the northern margin of the North China Craton. Phys Earth Planet Inter, 2007, 161: 36–49
- 33 Zheng T Y, Zhao L, Xu W W, et al. Insight into the geodynamics of cratonic reactivation from seismic analysis of the crust-mantle boundary. Geophys Res Lett, 2008, 35: L08303, doi: 10.1029/2008GL033439
- 34 Zheng T Y, Zhao L, Xu W W, et al. Insight into modification of North China Craton from seismological study in the Shandong Province. Geophys Res Lett, 2008, 35: L22305, doi: 10.1029/2008GL035661
- 35 Zheng T Y, Zhao L, Zhu R X. New evidence from seismic imaging for subduction during assembly of the North China Craton. Geology, 2009, 37: 395–398

- 36 朱日祥, 郑天愉. 华北克拉通破坏机制和古元古代板块构造体系. 科学通报, 2009, 54: 1950–1961
- 37 Chen L, Zheng T Y, Xu W W. A thinned lithospheric image of the Tanlu Fault Zone, eastern China: Constructed from wave equation based receiver function migration. *J Geophys Res*, 2006, 111: B09312, doi: 10.1029/2005JB003974
- 38 Chen L, Wang T, Zhao L, et al. Distinct lateral variation of lithospheric thickness in the Northeastern North China Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 267: 56–68
- 39 Chen L. Lithospheric structure variations between the eastern and central North China Craton from S- and P-receiver function migration. *Phys Earth Planet Inter*, 2009, 173: 216–227
- 40 Chen L, Cheng C, Wei Z G. Seismic evidence for significant lateral variations in lithospheric thickness beneath the central and western North China Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 2009, 286: 171–183
- 41 Menzies M A, Xu Y G, Zhang H F, et al. Integration of geology, geophysics and geochemistry: A key to understanding the North China Craton. *Lithos*, 2007, 96: 1–21
- 42 Ai Y S, Zheng T Y. The upper mantle discontinuity structure beneath eastern China. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 2089, doi: 10.1029/2003GL017678
- 43 Ai Y S, Zheng T Y, Xu W W, et al. Small scale hot upwelling near the North Yellow Sea of eastern China. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L20305, doi: 10.1029/2008GL035269
- 44 Chen L, Ai Y S. Discontinuity structure of the mantle transition zone beneath the North China Craton from receiver function migration. *J Geophys Res*, 2009, 114: B06307, doi: 10.1029/2008JB006221
- 45 许卫卫, 郑天愉, 赵亮. 华北地区 410 km 间断面和 660 km 间断面结构——克拉通活化的地幔动力学状态探测. 中国科学: 地球科学, 2011, 41: 678–685
- 46 Huang J L, Zhao D P. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. *J Geophys Res*, 2006, 111: B09305, doi: 10.1029/2005JB004066
- 47 Ringwood A E. Phase-transformations and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, 55: 2083–2110
- 48 Bina C, Helffrich G. Phase transition Clapeyron slopes and transition zone seismic discontinuity topography. *J Geophys Res*, 1994, 99(B8): 15853–15860
- 49 Fei Y, Van Orman J, Li J, et al. Experimentally determined postspinel transformation boundary in Mg_2SiO_4 using MgO as an internal pressure standard and its geophysical implications. *J Geophys Res*, 2004, 109(B2), doi: 10.1029/2003JB002562
- 50 Karmalkar N R, Duraiswami R A, Chalapathi R N V, et al. Mantle-derived mafic-ultramafic xenoliths and the nature of Indian sub-continental lithosphere. *J Geol Soc India*, 2009, 73: 657–679
- 51 Griffin W L, Kobussen A F, Babu E V S S K, et al. A translithospheric suture in the vanished 1-Ga lithospheric root of South India: Evidence from contrasting lithosphere sections in the Dharwar Craton. *Lithos*, 2009, 112(Suppl 2): 1109–1119
- 52 Lehmann B, Burgess R, Frei D, et al. Diamondiferous kimberlites in central India synchronous with Deccan flood basalts. *Earth Planet Sci Lett*, 2010, 290: 142–149
- 53 Carlson R W, Boyd F R, Shirey S B, et al. Continental growth, preservation, and modification in Southern Africa. *GSA Today*, 2000, 10: 1–7
- 54 Griffin W L, Graham S, O'Reilly S Y, et al. Lithosphere evolution beneath the Kaapvaal Craton: Re-Os systematics of sulfides in mantle-derived peridotites. *Chem Geol*, 2004, 208: 89–118
- 55 King S D. Archean cratons and mantle dynamics. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 234: 1–14
- 56 Hieronymus C F, Shomali Z H, Pedersen L B A. Dynamical model for generating sharp seismic velocity contrasts underneath continents: Application to the Sorgenfrei-Tornquist Zone. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 262: 77–91
- 57 Petitjean S, Rabinowicz M, Grégoire M, et al. Differences between Archean and Proterozoic lithospheres: Assessment of the possible major role of thermal conductivity. *Geochim Geophys Geosys*, 2006, 7: Q03021, doi: 10.1029/2005GC001053
- 58 Sonder L J, Jones C H. Western United States extension: How the West was widened. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1999, 27: 417–462
- 59 Zandt G, Gilbert H, Owens T J, et al. Active foundering of a continental arc root beneath the Southern Sierra Nevada, California. *Nature*, 2004, 431: 41–46
- 60 Boyd O S, Jones C H, Sheehan A F. Foundering lithosphere imaged beneath the southern Sierra Nevada, California, USA. *Science*, 2006, 305: 660–662
- 61 徐义刚, 李洪颜, 庞崇进, 等. 论华北克拉通破坏的时限. 科学通报, 2009, 54: 1974–1989
- 62 Ren J Y, Tamaki K, Li S T, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas.

- Tectonophysics, 2002, 344: 175–205
- 63 Sun W D, Ding X, Hu Y H, et al. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 262: 533–542
- 64 Bartolini A, Larson R L. Pacific microplate and the Pangea supercontinent in the Early to Middle Jurassic. *Geology*, 2001, 29: 735–738
- 65 Larson R L. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume. *Geology*, 1991, 19: 547–550
- 66 Machetel P, Humler E. High temperature during Cretaceous avalanche. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 208: 125–133
- 67 Wilde S A, Zhou X H, Nemchin A A, et al. Mesozoic crust-mantle beneath the North China Craton: A consequence of the dispersal of Gondwanaland and accretion of Asia. *Geology*, 2003, 31: 817–820
- 68 Maruyama S, Seno T. Orogeny and relative plate motions: Example of the Japanese Islands. *Tectonophysics*, 1986, 127: 305–329
- 69 Humler E, Langmuir C, Daux V. Depth versus age: New perspective from the chemical compositions of ancient crust. *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 173: 7–23
- 70 Revenaugh J, Jordan T H. Mantle layering from ScS reverberations: 2 The transition zone. *J Geophys Res*, 1991, 96: 19763–19780
- 71 Chen L. Concordant structural variations from the surface to the base of the upper mantle in the North China Craton and its tectonic implications. *Lithos*, 2010, 120: 96–115
- 72 Tommasi A, Gibert B, Seipold U, et al. Anisotropy of thermal diffusivity in the upper mantle. *Nature*, 2001, 411: 783–786
- 73 Vauchez A, Barruol G, Tommasi A. Why do continents break up parallel to ancient orogenic belts? *Terra Nova*, 1997, 9: 62–66
- 74 Fouch M J, James D E, VanDecar J C, et al. The Kaapvaal seismic group, mantle seismic structure beneath the Kaapvaal and Zimbabwe cratons. *South African J Geol*, 2004, 107: 33–44
- 75 Gregersen S, Voss P, Nielsen L V, et al. Uniqueness of modeling results from teleseismic P-wave tomography in Project Tor. *Tectonophysics*, 2010, 481: 99–107
- 76 Lesne O, Calais E, Deverchère J, et al. Dynamics of intracontinental extension in the north Baikal rift from two-dimensional numerical deformation modeling. *J Geophys Res*, 2000, 105: 21727–21744
- 77 Burke K, Ashwal L D, Webb S J. New way to map old sutures using deformed alkaline rocks and carbonatites. *Geology*, 2003, 31: 391–394
- 78 Barruol G, Silver P G, Vauchez A. A seismic anisotropy in the eastern United States: Deep structure of a complex continental plate. *J Geophys Res*, 1997, 102: 8329–8348
- 79 Yuan H, Romanowicz B. Lithospheric layering in the North American Craton. *Nature*, 2010, 466: 1063–1068
- 80 Lenardic A, Moresi L N, Muhlhaus H. Longevity and stability of cratonic lithosphere: Insights from numerical simulations of coupled mantle convection and continental tectonics. *J Geophys Res*, 2003, 108: 10.1029/2002JB001859
- 81 Carlson R W, Pearson D G, James D E. Physical, chemical, and chronological characteristics of continental mantle. *Rev Geophys*, 2005, 43: RG1001, doi: 10.1029/2004RG000156