

# 地震各向异性约束下的内核动态史

Daniel A. Frost Marine Lasbleis Brian Chandler 和 Barbara Romanowicz

(译: 赵新爱, [吴晶](#)/地质地球所岩石圈室)

地球内核的逐步结晶驱动了外核的对流和磁场的产生。因此, 确定内核生长速率和模式对于理解地球发电机的演化是至关重要的。地震各向异性的分布和强度可能记录了内核的生长历史, 地球内核地震各向异性是由内核固液边界约束的变形引起的。本文通过对地震体波走时的分析, 地震各向异性强度在内核中随着深度的增加而增强且各向异性最强的方向偏离地球旋转轴。然后, 利用地球动力学增长模型和矿物物理学计算, 我们以自洽的方式模拟了内核各项异性的发展过程。由此我们发现一个由六方最密堆积铁镍合金组成的内核, 通过优先赤道生长和缓慢平移的组合变形, 不需要半球带有尖锐的边界就可以匹配地震观测。我们的内核生长历史模型与外核动力学约束相兼容, 并支持相应年轻的内核( $\sim 0.5\text{Ga}$ - $1.5\text{Ga}$ )和黏度 $>10^{18}\text{Pa s}$ 。

在 30 多年前, 为解决平行于地转轴传播的 IC 敏感地震体波(PKPdf)早期到时和核敏感自由震荡的异常分裂问题。有人提出, 地震各向异性的存在, 内核中的地震波波速与其传播方向有关的观点, 这种各向异性被认为是由于内核演化造成流体变形引起铁晶体的排列。此前, 我们探讨了不同的地球动力学和塑性变形机制来解释 PKPdf 走时随射线路径相对于旋转轴的角度变化。这里我们结合了 IC 内流动的地球动力学模型, 考虑缓慢的横向平移, 利用内核现有的矿物学知识和变形机制来解释更新数据集中的观测地震走时的空间模式。

事实上, 基于 PKPdf 走时测量的早期地震各向异性模型具有恒定圆柱形各向异性, 且快轴平行于地球旋转轴。对于 IC 结构的进一步研究揭示了日益增长的复杂性。目前的 IC 模型是由两个各向异性强度不同的类半球组成, 类西半球平均约为 $\sim 4.8\%$ , 类东半球平均约为 $\sim 1.4\%$ 。在 IC 中央, 各向异性强度随 IC 深度的增加可以达到  $8.8\%$ 。然后, 由于地震和台站分布限制, 之前的模型在极地路径上的数据覆盖性很差。

## 非对称各向异性分析

为了解决这个问题，我们从最近地震分布上对 PKPab-df 和 PKPbc-df 进行新的微分走时测量(图 1 和拓展数据图 1)，在大深度范围沿极地方向增加了对 IC 的采样，并把它们添加到现有的全球采集中(后面的方法部分会介绍)。更新的数据库对靠近地转轴，从内核边界到地球中心 35 公里内的 IC 进行采样。

微分走时异常表示为 IC 内有效纵波速度异常( $d \ln V = -\frac{dT}{T_{ic}}$ ， $T$ 地震波走时， $dT$ 是微分走时异常， $T_{ic}$ 是穿过 IC 的时间， $V$ 是有效速度)展示了 $\xi$ 值与 IC 内路径相对于地转轴的角度有很强的依赖性(图 1a)，极地路径上最长距离的残差高达 9.9s，对于更多的赤道路径达到 $\pm 2s$ (拓展数据图 2)。而且残差依赖于经度和射线转折点的深度。最初，就像之前发现的那样，数据展示了半球差别(图 1 和拓展数据图 3)。假设各向异性与任意半球深度成线性相关，我们确定 WH 最佳的西部边界在 166°W-159°W。然后尖锐的半球界面很难与 IC 生长地球动力学动力模型相一致。

通过进一步测试数据，我们发现有效速度异常随着深度线性增加，即在两个半球 IC 转折点半径(图 2b)。在两个半球上距离的梯度近似相等，但在 WH 较大速度异常有一个偏差。对于极地路径( $0^\circ < \xi < 15^\circ$ ) (拓展数据图 5) 来说梯度是最陡峭的和最稳健的定义，且其与 $\xi$ 有关系。WH 记录着最大有效速度异常( $\geq 3.5\% d \ln V$ )，在经度 $\sim 60^\circ W$ 、半径约为 400 公里(距离 $\geq 170^\circ$ )射线底部，而不是 IC 的中心。走时数据表明深度和各向异性有关，最初是光滑的相对于地球中心是非对称的，而不是半球之间带有尖锐界面的半球模式。

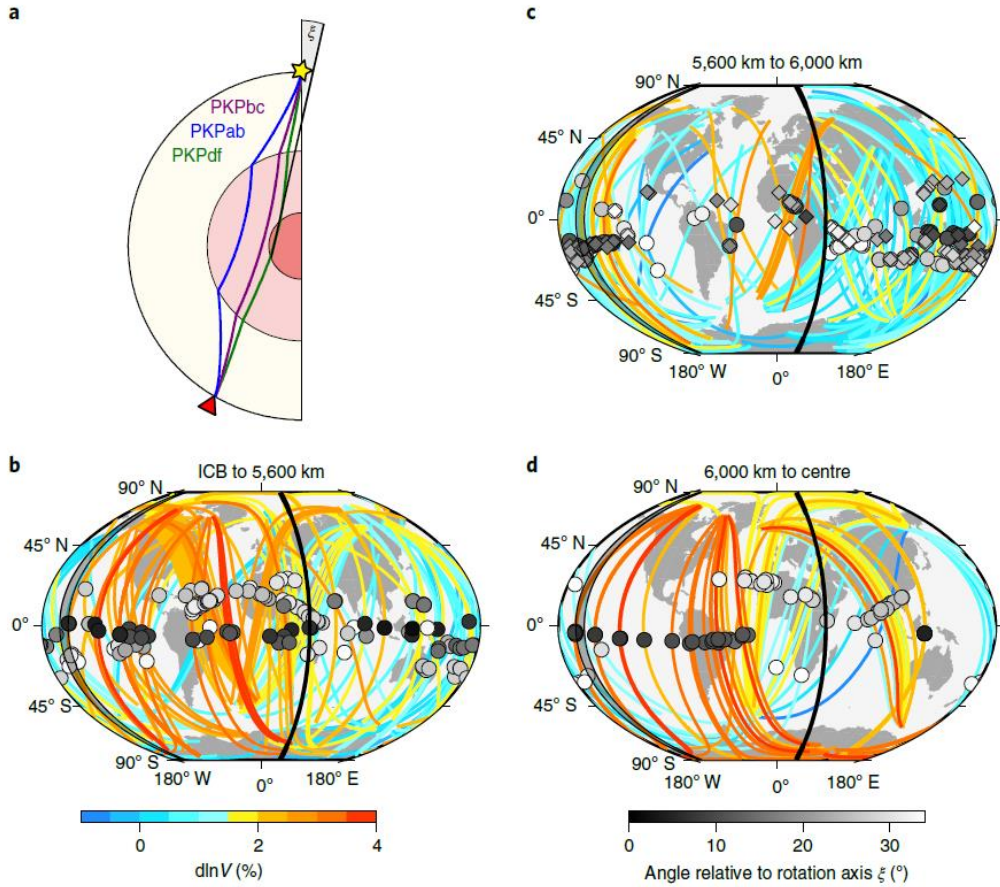


图 1. 用极点 PKP 射线对内核采样。a, 这里使用 PKP 分支的射线路径示例源(星形)和接收器(三角形)。PKPdf 对 IC 进行采样, PKPbc 和 PKPab 仍在外核,  $\xi$  是 IC 中 PKPdf 路径与地球旋转轴之间的夹角。b-d, 只有从震源到接收器的极路径弯曲时, 使用有效 IC 速度异常(线条)和  $\xi$ (符号色)进行颜色编码, 深度 5200 到 5600 公里(b), 5600 到 6000 公里(c), 6000 公里到地球中心(d); 显示了 530 条极路径。PKPbc-df 和 PKPab-df 射线对的转折点分别用菱形和圆形表示。我们剔除了从南桑威奇群岛(SSJ)到阿拉斯加的路径。灰色区域是本研究确定的最拟合的 WH 边界, 实线表示 EH 边界。

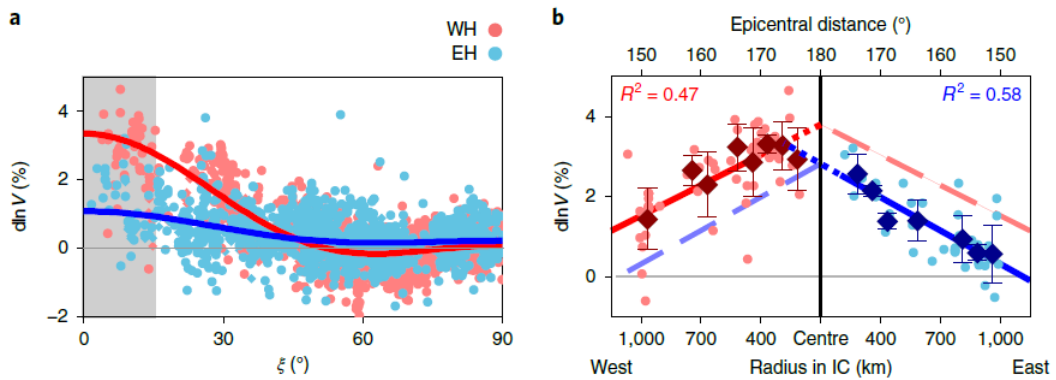


图 2. 从 PKPbc-df 和 PKPbc-df 走时观测得到的内核有效速度异常作为 $\xi$ 和震中距离的函数。a, 有效速度异常作为 $\xi$ 的函数显示出半球形模式, 这意味着 WH(红色)比 EH(蓝色)更强的各向异性。每个半球拟合方程 S1 的各向异性曲线显示为实线。南桑威奇群岛到阿拉斯加数据排除在外(扩展数据图 9)。b, 对于 $\xi \leq 15^\circ$ (a 中阴影部分)的数据, 在 WH(左)和 EH(右)中, IC 速度异常是震中距离和射线底部半径的函数。实线表示在相应半球的距离的函数线性拟合, 穿过地球中心( $180^\circ$ )的镜像显示为虚线。移动平均线(菱形线)和标准差以  $2.5^\circ$  的距离增量突出了平稳趋势。EH 趋势以蓝色虚线扩展到满足 WH 趋势(在 400 公里半径处), WH 趋势以红色虚线扩展到超出数据约束的旋转轴。

### 内核生长各向异性结构

为了去解释地震观测结果, 我们认为, 由于外核泰勒柱对流, 内核可能在赤道优先生长, 从而在圆柱径向上产生更有效的热传递。均衡调整将使扁球形 IC 从赤道向内流动, 向上流向两级。如果存在强密度分层, 这种流动将被限制在最顶层, 反之, 则会在深层引起变形。赤道平面上 IC 的任何不对称热提取都会导致不对称增长, 导致增长中的 IC 的横向平移, 从而减慢净平移。以往的研究试图通过二级流动解释各向异性的深度依赖性, 并通过一级流动解释半球形二分法。然而, 这些半球研究考虑了导致一级流动的快速对流不稳定性, 单是这种不稳定性无法产生观测到的地震各向异性模式和强度。在地震观测结果的指导下, 我们结合赤道优先生长和半球非对称生长的过程, 模拟了中性分层 IC 中的流型(图 3, 方法)。应变晶体沿平移轴的平流使高变形区横向偏离旋转轴, 高变形区横向偏离旋转轴取决于选择的平移率。这里一个关键的假设是, 平移速率比生长速率慢, 这是由于不同的生长而不是由于两侧半球同时的融化和冰冻造成的。考虑到约束条件, IC 的年龄和平移速度都是该模型的自由参数。IC 在赤道和两极之间的差异生长速率由参数 S2 描述, 它控制应变的大小和模式。从动力学参数上 S2 松散地约束在 0 和 1 之间, 而外核的地球动力学模型的值约为~0.4。对 S2 的约束作用不强, 但可以从矿物物理学中引入额外的信息, 从而对各向异性的应变率依赖性发展提供约束。

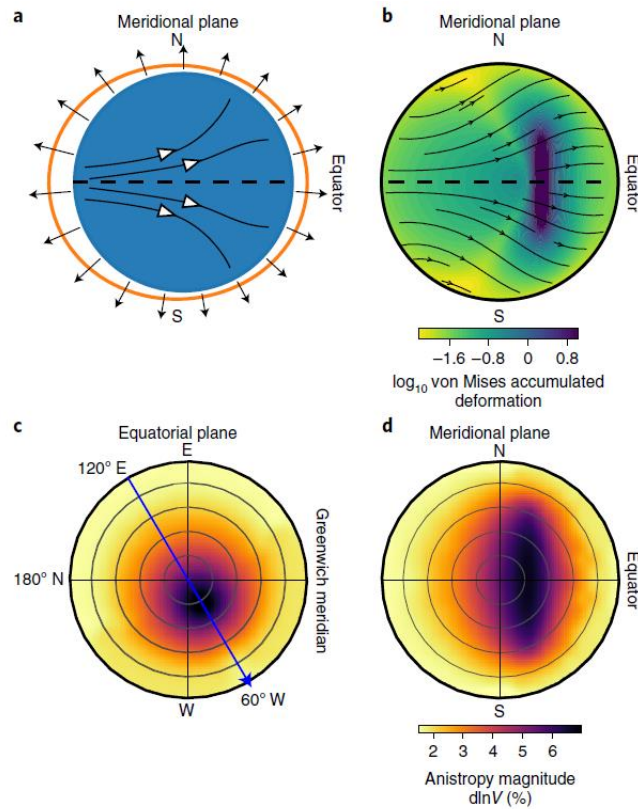


图 3. 内核生长、应变和各向异性。a, 将赤道优先生长(外核泰勒柱对流驱动)和非对称生长速率分别与黑白箭头所示边界和内部流动施加的 IC 生长速率和期望地形相结合的草图(夸张视觉)由橙色线条显示。b, 不对称的生长和从赤道向两极的移动造成了最强的横向和垂直平流变形。a 和 b 都表示沿平移轴的子午面, 虚线表示赤道。应变场使铁晶粒排列, 在深部 IC 产生强烈的各向异性, 在赤道面(c)上偏离旋转轴(N-S), 在子午面(d)上平行于旋转轴, 沿 c 中蓝色箭头所示的平移方向伸长。计算时 IC 年龄为 0.5 Ga,  $S_2$  为 0.6, 平移率为 0.3, 平移方向从 120°E 到 60°W。

在我们的模型中, 目前 IC 地震各向异性是初始单晶各向异性、晶体变形滑移面和流场的函数。为了在 IC 长度尺度上产生足够的各向异性, 多晶的晶体排列是必要的。利用粘塑性自洽模型, 我们计算了在不同的 IC 年龄、平移速率和单晶结构下由地球动力学模型产生的应变场中位错蠕变引起的各向异性。尽管体心立方铁具有较强的单晶各向异性, 但我们发现它不能产生较强的多晶各向异性, 面心立方铁也不能, 这在以前也已经证明过。相比之下, 六方最密堆积(hcp)铁镍合金( $\text{Fe}_{93.75}\text{Ni}_{6.25}$ )的塑性变形与  $\langle c + a \rangle$  锥体平面的滑移形成了各向异性 IC, 其各向异性高达 6.6%(图 3d), 能够很好地拟合地震数据。在该模型中, 各向异性的快



波方向与旋转轴对齐，慢波方向随深度而变化(扩展数据图 6)，与观测数据相匹配。纯 hcp 铁与我们的观测结果不匹配(扩展数据图 7 和 8)。

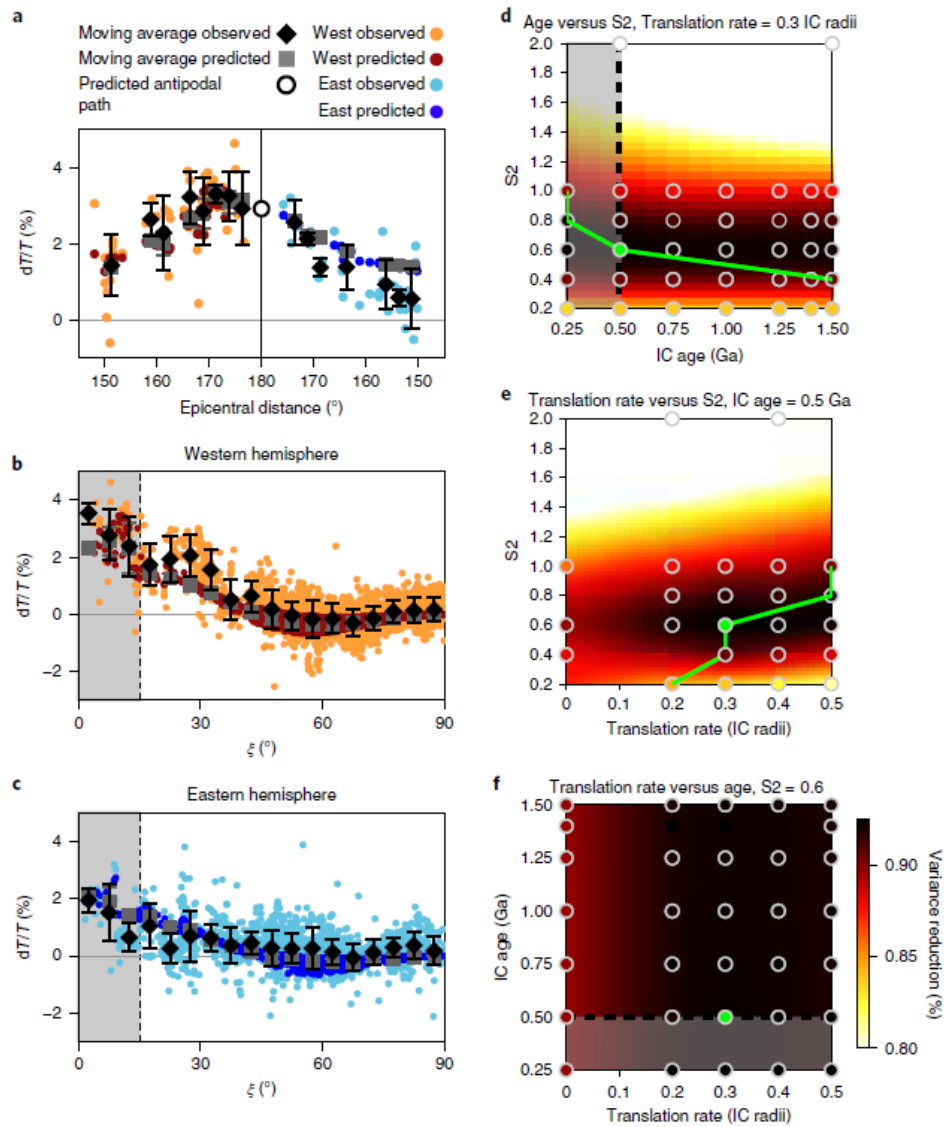


图 4. 在 5500 K 和 360 GPa 下，六方最密堆积  $\text{Fe}_{93.75}\text{Ni}_{6.25}$  预测的 PKP 速度异常与观测的 PKP 速度异常以及 IC 年龄、S2 和平移率之间的权衡。a-c，预测(深蓝色和红色点，灰色方块为平均值)和观测(浅蓝色和橙色点，黑菱形为平均值)有效速度异常作为震中距函数，对于(a)  $\xi \leq 15^{\circ}$  的数据，由 b 和 c 的阴影区域标记，并作为图 3 中 IC 生长模型的西半球(b)和东半球(c)  $\xi$  的函数。空心圆表示沿旋转轴路径的预测有效速度异常。数据的误差棒显示平均值和 2.5  $\sigma$  和 5  $\sigma$  增量(b,c)的一个标准差。d-f，模型相对于 IC 年龄与 S2(d)、S2 与平移速率(e)、平移速率与 IC 年龄(f)之间权衡的数据的方差缩减，灰色圆圈标记待测值，绿圆圈标记最佳拟合参数，对应于模型在 a-c 和 3D 空间的采样点。绿线跟踪任意给定 y 值下的最佳 x 值。

根据地核电导率，阴影区域模型的 IC 年龄太小。曲面用最小曲率样条插值。

IC 生长引起的流场模式和强度影响晶体所受的应变，并受 IC 年龄、S2、平移速率和平移方向控制。IC 年龄在应变率和持续时间之间达到一个权衡，但位错蠕变与应力和应变速率之间是非线性关系(方法部分会介绍)，这推断出着晶体排列的程度和模式，因此产生的模式和强度地震各向异性随时间、即随着 IC 的年龄变化。总应变由参数 S2 控制;因此，应变速率受 IC 年龄和 S2 年龄的控制。我们通过驱动具有一定年龄、平移率和 S2 值的模型来约束 IC 的生长历史，并将这些模型的预测各向异性与我们的地震观测进行比较(图 4)。和数据拟合最好的模型是  $0.4 \leq S2 \leq 0.8$ 。在可接受的 IC 年龄范围内(方法)，我们发现  $S2 = 0.6$  和 IC 年龄为 0.5 Ga 时与地震观测和地球动力学约束拟合最好，尽管对年龄的约束不是很强(图 4d-f; 方法)。在赤道面从  $120^\circ\text{E}$  到  $60^\circ\text{W}$  的 0.5 Ga IC 寿命上，以  $0.3IC$  半径的速率平移符合各向异性的地理模式，极地数据的方差减少了 93%，而没有平移的模型的方差减少了 89%。我们的模型显示各向异性强度随着深度的增加而增加。该模型也表现出在 ICB 附近 WH 的弱的各向异性比 EH 更强，这与 PKIKP 和 P'P'df 走时测量得到的 IC 顶部半球状各向同性模型等价，并且对正常模式各向异性的大小和分布有约束。

观测结果与预测之间仍存在差异，可能是由于地幔结构和 IC 中的小尺度结构污染了观测。虽然微分测量消除了上地幔非均质性对 PKP 走时的部分影响，但地幔中深处的三维(3D)速度结构依旧会对它们产生影响。我们观测到的最大走时异常(9.9s)是  $170^\circ$  和  $175^\circ$  距离之间的 PKPab-df 测量值，该区域中两条射线路径之间有很大的横向距离，因此它们在地幔深处可能具有极不相同的速度。此外，地幔速度异常，如超低速带(ULVZs)和大低切变速度区(LLSVPs)最多可产生 1-2 s 的走时延迟。此外，具有大走时异常的数据在明显不同的位置穿透核-幔边界(图 1b-d)，这些地区尚未见超低速带显示。因此，地幔结构将会造成散射，而不是强烈地掩盖我们所模拟的一阶 IC 各向异性模式。

## 地幔地核演化的意义

在假设的范围内，特别是位错蠕变假设，所提出的模型对 IC 的物理性质有一定的影响。假设 Yoshida 式变形限制了可能的 IC 粘度范围( $\eta > 10^{18}$  Pa s)，并要

求 IC 年龄大于扩散时间尺度, 根据所选择的内核电导率, 扩散时间尺度可能在 0.2 至 1.5 Ga(参考文献 4)之间。这种约束将粘度置于最近由密度函数理论得到的范围的上端。我们的模型表明, IC 的地震结构记录了 ICB 的大规模热流模式, 这是由外核动力学和核-幔边界的热流量变化控制的。我们的优选模型的平移率为 0.3, 极赤道生长比(S2)为 0.6。这对应着一个增长率, 与全球平均水平相比, 两极低 40%, 赤道高 130%。赤道地区的增长率在东半球和西半球之间各不相同, 分别为全球平均增长率的 100%到 160%。这一模式与基于现今下地幔结构的地核顶部热流量驱动地球发电机所得到的模式相似, 表明在与 IC 年龄相近的时间内, 排热不对称性在外核中一直稳定存在。这与目前观测到的在地幔底部被高速环隔开的大尺度低速带可能至少在 200-300 Ma 内是稳定的迹象一致(参考文献.31-33), 并且地幔中存在稳定对流模式的潜在结构。相比之下, 地磁观测的外核模式表明了由自下而上的相互作用所引起的 IC 动力学从被动动力学到主动动力学的最近变化, 或者说内核和外核之间的复杂相互作用可能比本文所考虑的小。我们的模型支持相对较高的地核电导率, 因为它有利于年轻的 IC (年龄~0.5 Ga), 并要求不存在对流不稳定性。为阻止年龄为 0.5 Ga 的 IC 热不稳定性发展, 这需要 IC 的热导率 $>120$ 。更好地解析 IC 中地震各向异性的三维模式, 有助于进一步记录 IC 的不均匀生长历史, 为外核动力学的全球尺度模式提供记录。虽然我们的模型没有考虑 IC 的小尺度地震结构, 但我们提供了一个完整的 IC 增长模型, 能够匹配观测到的地震各向异性, 并与现有的古地磁观测和矿物物理学数据相一致。

## 线上内容

任何方法、附加参考文献、自然研究报告摘要、源数据、扩展数据、补充信息、致谢、同行评议信息; 作者贡献和竞争利益的细节; 数据和代码可用性的声明可以在 <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00761-w> 上找到。

## 方法

### 地震学

我们采集 PKPab-df 和 PKPbc-df 微分走时测量来确定内核结构(图 1)。因此,



根据一维参考模型计算的微分走时异常可以归结为 IC，至少是一阶。

使用数据集包括现有的加州大学伯克利分校 PKP 走时数据集和其他数据。这个集合包括 2944 个 PKPab-df 和 1170 个 PKPbc-df 微分走时测量值。在此，我们补充了 2015 年 10 月 23 日至 2017 年 9 月 15 日期间在阿拉斯加和北半球其他附近台站观测到的南三明治群岛最近地震事件和 2008 年 1 月 1 日至 2017 年 6 月 31 日期间在纬度大于 50°N 处观测  $M > 5.5$  的地震事件以及在距离超过 150° 的南半球台站观测到的 PKPab-df 和 416 个 PKPbc-df 测量数据，使用 SOD 质量下载器和 IRIS 联合研究机构 Wilber3 工具收集数据(从南三明治群岛到阿拉斯加的 289 个观测数据和从南极洲观测到的其他高纬度事件的 741 个观测数据)。这些地震事件记录在 YT、ZM、2C、AI、AU、ER、G、GE、II、IU、PS、SY、C、9G 和 ID 地震台网上。

2009 年前后事件的地点和到达时间分别来自 EHB44 和国际地震中心(ISC)目录。我们从垂直分量数据中去除线性趋势和均值，并将对速度的仪器响应分解，在 0.4~2.0 Hz 之间进行带通滤波，并应用 Hilbert 变换解决 PKPab 与 PKPdf 之间的相移。在应用椭圆度校正后，我们手动从一维参考模型 ak135 (参见 45) 中挑选出相对于预测时间的相位起始点。PKPdf 和 PKPbc 在未变换的数据上选取，PKPab 在 Hilbert 变换的数据上选取。我们根据信号起始的清晰度和信号在未过滤的迹中的突出程度对其进行分类。经过挑选和分类，保留了 614 个和 416 个最高质量的 PKPab-df 和 PKPbc-df 微分走时，分别测量了 ak135 (扩展数据如图 2 所示，按质量分割)。这些新的测量结果与上述现有目录相结合，分别得到 3,558 和 1,586 个高质量的 PKPbc-df 和 PKPbc-df 测量结果，在本文中，我们只使用高质量的数据进行绘图和计算。

将整个走时异常归因于 IC 内的结构，因此我们可以把走时转换为相对于一维模型 ak135 的速度异常即： $-\frac{dT}{T_{ic}} = \frac{dv}{v}$ ， $T_{ic}$  和  $v$  分别表示 IC 中的参考走时和速度。这就解释了浅层和深层中波传播路径长度之间的差异，我们构建了各向异性的圆柱对称模型，其中球对称模型可以表示为：

$$\frac{\delta v}{v} = a + b \cos^2 \xi + c \cos^4 \xi$$

这里 $v$ 和 $\delta v$ 分别表示参考速度和其扰动， $\xi$ 是射线底部点的射线路径方向相对于地转轴的角度。我们通过对异常值进行L1范数来拟合数据，从而确定系数 $a$ 、 $b$ 和 $c$ (这取决于深度和位置以及所考虑的模型)。视速度异常是沿内核射线路径速度异常的综合作用。为更好地说明半球间差异，我们通过网格搜索西半球西部边界的位置来更新半球边界。我们将东部边界固定于之前发现的边界上，因为我们的数据集在该地区的覆盖范围有限，而之前的研究旨在对东部边界采样。为了检验具有半球形和深度相关各向异性的IC模型，我们将数据分割成由候选边界描述的两个半球，并将速度异常拟合模型作为距离极点数据( $\xi \leq 15^\circ$ )的函数。只有极坐标数据具有显著的半球性，因此我们排除了较高的 $\xi$ 数据，以避免与分辨率较低的数据拟合出现偏差。我们寻求对两条直线间的组合误配最小化(扩展数据图5)。半球是根据射线转折点的经度来分配的，这种近似对极地数据很有效，但对赤道数据却会导致半球差异更模糊。然而，由于赤道数据没有显示半球之间的巨大差异，这种近似是没有问题的。当西半球的西边界位于 $166^\circ\text{W}$ 和 $159^\circ\text{W}$ 之间时，与数据吻合程度相同，在 $<166^\circ\text{W}$ 或 $>153^\circ\text{W}$ 位置 $R^2$ 下降非常剧烈。当我们把边界简化成一条经度恒定的线时，我们不能排除西边的边界是弯曲的。当我们对非极区数据重复这个测试时， $\xi < 35^\circ$ ，最佳拟合的半球位置类似于在 $<153^\circ\text{W}$ 急剧下降。

为了确定每个半球中速度随深度的解析梯度的稳定性，我们使用图2b中显示的数据进行交互效应分析。我们发现，达到95%的置信度，我们不能排除两个半球梯度相同的原假设，即两个半球梯度在统计上是相同的。为了确定两个梯度之间截距中偏移量的稳定性，我们对同一数据进行自引重采样。我们发现，自引均值的二次标准差在两个半球之间没有重叠。我们得出结论，在两个半球，速度随深度的趋势在统计上有明显的截距，但在统计上有非常相似的梯度。

### 南桑威奇群岛到阿拉斯加异常

阿拉斯加台站记录的PKPbc-df和PKPab-df数据显示了不符合全球格局的走时异常的传播，它们与 $\xi$ 的函数有关(拓展数据图9)。这对于PKPbc-df测量结果来说尤其明显，该测量显示走时异常高达6秒，而阿拉斯加以外的大多数极地路径上的测量值不到3秒，这些数据可能被阿拉斯加板块所影响。因此，我们从

这里的分析中剔除了阿拉斯加记录的数据，但我们保留了阿拉斯加地震事件的数据，这些数据不受板块的影响，符合全球趋势(拓展数据图 9)。

## 地球动力学

不同研究小组提出，由内核不同生长速率引起的内核边界处形貌的粘性松弛可能会使内核中的晶体定向排列，并解释内核块体的各向异性(补充图 1)。在赤道优先生长引起内核流动具有垂直的圆柱对称轴特征，并倾向于沿着该轴将晶体排列在靠近内核中心的位置。然而，这样的模型不能解释对 IC 各向异性的半球差异的观察。同时，已经提出由 IC 相对两侧的同时熔化和结晶或不稳定成分梯度引起的横向平移来解释 IC 中的半球二分法。

在这里，我们考虑由内核边界的生长速率差异所引起的流动，其中的生长速率差异是先前研究的两种模式的总和:优先赤道生长和半球形不对称生长(补充图 1)。我们考虑内核的中性密度分层，因为它是在深度处发生变形的唯一方式。这大大减少了可以观察到这种流动的参数空间，因为稍微不稳定的密度分层会产生大规模的对流，而稳定的密度分层会抑制径向流动，并且在内核边界附近形成高变形层。如前所述，赤道的优先增长仍会产生大规模流动，以实现大粘度值( $\eta > 10^{18}$  Pa s)和大于扩散时间尺度(0.2-1.5 Ga)的内核年龄的稳定分层。Yoshida 对流假设限制了 IC 可能的粘度范围。

我们在一个球壳中求解具有恒定粘度 $\eta$ 和恒定密度 $\rho$ 的不可压缩流体的动量守恒方程，球壳的半径为  $R_{ic}(t)$ 且其随时间增长满足  $R_{ic}(t) = R_{ic}(\tau_{ic})\sqrt{t/\tau_{ic}}$ 从内核形成的时间 $t = 0$ 到当前时间 $\tau_{ic}$ 。中性分层的假设使得赤道型和半球型的流动都有一个完整的解析解。

为了确定一个粒子在内核中的轨迹，我们确定了粒子今天的位置( $\tau_{ic}$ )，并使用 GrowYourIC 将轨迹逆时积分，轨迹与过去 ICB 的交点对应的是材料的结晶时间。我们随时间输出粒子的位置、速度分量和速度梯度，并使用它来计算晶体取向。为了获得粒子所经历变形的第一个概念，我们计算了 von Mises 等效应变率及其在 $t_{crystallization} > 0$  轨迹上的平均值。

在对内核中的生长和由此产生的应变进行建模时，我们还测试了 S2 对首选

的 IC 年龄和平移率的依赖性。我们探索了，以 0.1 IC 半径为增量，从 0 到 0.5 之间的平移率，IC 年龄在 0.25 到 1.5 之间，增量为 0.25，S2 介于 0.2 和 1.0 之间，增量为 0.2，寻找与观测的各向异性最匹配的模型。与快速平移模型不同，这种低于结晶速率的缓慢平移速率只需要差异冷冻而不需要熔化。我们计算了在无量纲化时间和 IC 尺寸下的核心增长和转换速率。然后，我们利用目前的内核半径 (1217.5 公里) 和内核的选定年龄对模型进行缩放。因此，我们通过 IC 年龄倒数 ( $1/\tau_{ic}$ ) 和时间步长 ( $dt$ ) 来缩放瞬时应变速率 IC 年龄 ( $dt \times \tau_{ic}$ )。内核年龄线性影响应变速率，但所有 IC 年龄的最大总累积应变等于 S2；因此，S2 的值影响总累积应变和应变速率，而 IC 年龄只影响应变速率。对于每个 IC 年龄、S2 和平移率，我们使用 VPSC 来计算产生的变形。我们通过位错蠕变模拟变形，因此应变速率和时间步长对各向异性的产生具有非线性影响。所得各向异性模型与我们的地震观测结果比较表明，最佳拟合年龄在 0.5 到 1.5 Ga 之间，基于 S2，在 IC 年龄上平移率为 0.3 半径。由于  $S2 < 0.4$  的模型产生的各向异性太小而无法匹配数据，而  $S2 \geq 0.8$  的模型需要 0.25 Ga（这可能太年轻）的 IC 年龄，我们确定 S2 的合理界限为  $0.4 \leq S2 \leq 0.6$ ，年龄分别在 1.5 和 0.5 Ga 之间进行权衡。参数 S2 的外部约束很差，但以前基于外核地球动力学考虑的工作首选是  $S2 = 0.4$ ，这与我们的首选范围一致。这些数据可以通过年龄与古地磁约束建议的范围（0.5 到 1.3 Ga）一致的模型拟合。各向异性强度取决于 IC 年龄和 S2，因此通过匹配给定 S2 的观察各向异性强度，我们可以估计 IC 年龄。 $S2 = 0.4$  和内核年龄  $> 0.5$  Ga 的模型产生强烈局部各向异性，能够与我们的观察相匹配。内核年龄小于 0.5 Ga 的模型具有小于 6.0% 的最大各向异性，并且具有最大各向异性的 IC 的体积非常小。这些模型预测的各向异性较弱，各向异性随深度的梯度比我们观察到的要低。而在较老的内核中，某些部位各向异性最高可达  $\sim 7.0\%$ ，从而实现几乎完全排列的晶体，其各向异性为 7.5%。当  $S2 = 0.6$ 、IC 年龄  $\geq 1.0$  Ga 时，预测的各向异性较强，局部最大各向异性约为 7.0%，与  $S2 = 0.4$ 、IC 年龄  $\geq 1.0$  Ga 模型相当。IC 的年龄还取决于 IC 粘度对应变速率的影响，但根据我们对 Yoshida 变形的假设，粘度固定为  $> 10^{18}$  Pa s。与 VPSC 模拟相比，hcp 铁镍合金更容易变形，具有更强的单晶各向异性或单晶各向异性的压力依赖性（扩展数据图 8）。然而，铁和铁合金在高压和高温下的变形行为和精确的各向异性模式都没有得到很好的约束。我们将得

到的各向异性模型绕旋转轴和赤道面以增量  $10^\circ$  旋转  $360^\circ$ ，并与数据进行对比。因此，我们发现最佳拟合的增长方向是从  $120^\circ\text{E}$  到  $60^\circ\text{W}$ ，增长最快和最慢的点分别位于 Banda 海和巴西下面。有趣的是，这些与参考文献 15 所模拟的生长和融化的焦点非常相似，尽管生长方向相反。

## 矿物物理学

我们计算了在上述应变场存在下由给定成分的 IC 变形所导致的各向异性。一个重要的组成部分是选择的成分，因为单晶的各向异性控制变形后体模型各向异性。实验研究表明 hcp 铁单晶在 IC 条件下是稳定的，但由于 IC 中存在较轻的元素，这会变得复杂。bcc 相铁单晶也可能是稳定的，这取决于应变场。第一性原理计算估计了纯铁单晶的各向异性，hcp 铁单晶的各向异性范围从 4.9 到 7.9% (给出了  $d\ln V$  从最小到最大的总范围)，bcc 铁的各向异性高达 14.7%，在 hcp 铁的熔点附近可能高达 20%，尽管对于各向异性随压力和温度的变化趋势存在争议。铁在其熔点附近的各向异性模式与观测 IC 各向异性有很大的不同。含有适度轻元素的铁合金改变了各向异性的特征，但有限的实验数量使其对压力和温度的依赖性不确定。选用的 hcp 铁镍合金 ( $\text{Fe}_{93.75}\text{Ni}_{6.25}$ ; 参考 19) 的单晶各向异性图 (补充图 2) 与观测到的各向异性图 (扩展数据图 3 和图 9) 最相似，它与地核成分的宇宙化学计算相一致。

我们使用 VPSC 模型程序计算了在上述 IC 生长模型产生的应变场存在下晶体优势取向 (CPO) 的发展。在 IC 的整个生长过程中，ICB 产生了 1500 个颗粒群，代表 hcp 铁镍合金 ( $\text{Fe}_{93.75}\text{Ni}_{6.25}$ ) 的晶体。在 ICB 上的晶体生长可能导致预变形。我们用初始凝固预织构模拟粒子，其中 hcp 铁晶体的 c 轴在 ICB 平面上定向排列，就像以前的工作一样。这组粒子在沿示踪路径受到应变时发生变形。变形受晶滑系统控制，我们采用了 hcp 铁单晶的晶滑系统。根据之前的研究，我们允许沿 hcp 铁的  $\langle c+a \rangle$  棱锥面滑动并锁定剩余的滑动系统，我们将基底面  $\langle a \rangle$ 、棱柱  $\langle a \rangle$  和棱锥  $\langle a \rangle$  平面滑移系统的归一化的临界解析剪应力设置为  $\infty$ ，锥体  $\langle c+a \rangle$  面滑移系统设置为 0.5。目前，我们测量合成的 CPO，将生长模型每一步发展的 CPO 与其各自的弹性张量相结合，以确定合成的各向异性。我们结合了从 *ab initio* 分子动力学模拟产生的弹性张量的估计。对于我们选择的 hcp 铁镍合金，弹性张量

仅适用于 0 K 和 360 GPa, 以及 5500 K 和 360 GPa (参考文献 19)。内核的温度范围可能非常小, 大约为 30 K(参考文献 73)。因此, 我们忽略了压力和温度对弹性常数的依赖关系, 计算了  $\text{Fe}_{93.75}\text{Ni}_{6.25}$  合金在 5500 K 和 360 GPa 下的 CPO(补充图 11)。东半球观测到的各向异性与预测的各向异性之间的差异(图 4a)可能是由于单晶各向异性相对于压力是固定的, 因此不允许足够弱的各向异性来匹配数据。

我们试图了解 IC 中物理状态随深度的变化对弹性张量的影响。如上所述, 我们忽略了温度依赖性, 因为它对弹性张量的影响很小, 但考虑了压力的影响。鉴于铁镍合金的数据有限, 我们使用纯铁评估各向异性的压力依赖性的影响, 其中有从 ab 最初计算得出的压力范围内的数据。压力作为半径的函数是从 PREM 中提取的, 该模型的压力范围从 ICB 的 330 GPa 到地球中心的 364 GPa, 选取 360 GPa 和 5500 K 作为参考点, 利用上述研究结果, 采用中间差分方法确定恒定温度下的压力导数。然后使用泰勒展开式将来自参考点的弹性常数插值到从参考点到沿地球动力学流线的每个位置的压力的二阶导数 (扩展数据图 8)。结果表明, 在 ICB 压力下, 纯 hcp 铁在 IC 中心的各向异性较弱为 5%, 较强为 7%。

为了预测由建模的各向异性产生的走时异常, 我们使用 TauP 通过 ICB 穿刺点之间的一维速度模型 ak135 追踪射线, 假设沿一维模型中的理论射线路径传播。我们将各向异性模型内插到  $50 \times 50 \times 50$  km 的网格间距并内插射线以增加空间采样。对于每个射线段, 我们在最近的模型位置找到各向异性, 测量射线段的  $\xi$  角, 使用 Christoffel 方程计算该角  $\xi$  的速度异常, 并计算给定射线段长度的结果走时异常。我们将射线上的走时异常相加, 以找到通过各向异性模型的每条路径的总预测异常。我们计算了大多数极地数据  $\xi < 15^\circ$  的观测和预测走时异常之间的方差减少, 而无需分离半球。

## 数据来源

支持这项研究结果的地震走时测量数据(图 1、2、4 和扩展数据图 3、5、7 和 9)可在补充数据 1 和 <https://doi.org/10.5281/zenodo.4721364> 上获得。原始地震波形数据和元数据可通过 IRIS 数据服务设施, 特别是 IRIS 数据管理中心进行访问。可从 ISC 进入 EHB Online Bulletins; 如需进入 EHB, 请参阅



<https://doi.org/10.31905/PY08W6S3>。

## 代码来源

VPSC7 代码来自 R. A. Lebensohn，有关访问该代码的信息可以在 <https://public.lanl.gov/lebenso/> 上找到。GrowYourIC 代码可以在 <https://github.com/MarineLasbleis/GrowYourIC> 上找到，此次工作使用的是 0.6 版本(参考文献 76)，使用 Generic Mapping Tools 制作了地块。

## 致谢

作者感谢了以下资金来源: D.A.F.和 B.R.得到美国国家科学基金会 EAR-1135452 和 EAR-1829283 的项目资助; M.L.得到了欧盟 Marie Skłodowska-Curie Grant Agreement No.795289 下的 Horizon 2020 研究和创新计划的资助; B.C 得到国家科学基金会的 EAR 基金 1343908 和美国能源部 DE-FG02-05ER15637 资助。

## 作者分工

所有作者都为项目设计、方法论开发、模型概念化和手稿准备做出了贡献。D.A.F.负责地震数据整理和正式分析，并撰写了论文的初稿，M.L.对地球动力学建模有贡献，B.C 提供矿物物理学输入；D.A.F. and B.R.负责协调此次项目。

## 利益纠纷

作者没有利益纠纷

## 附加信息

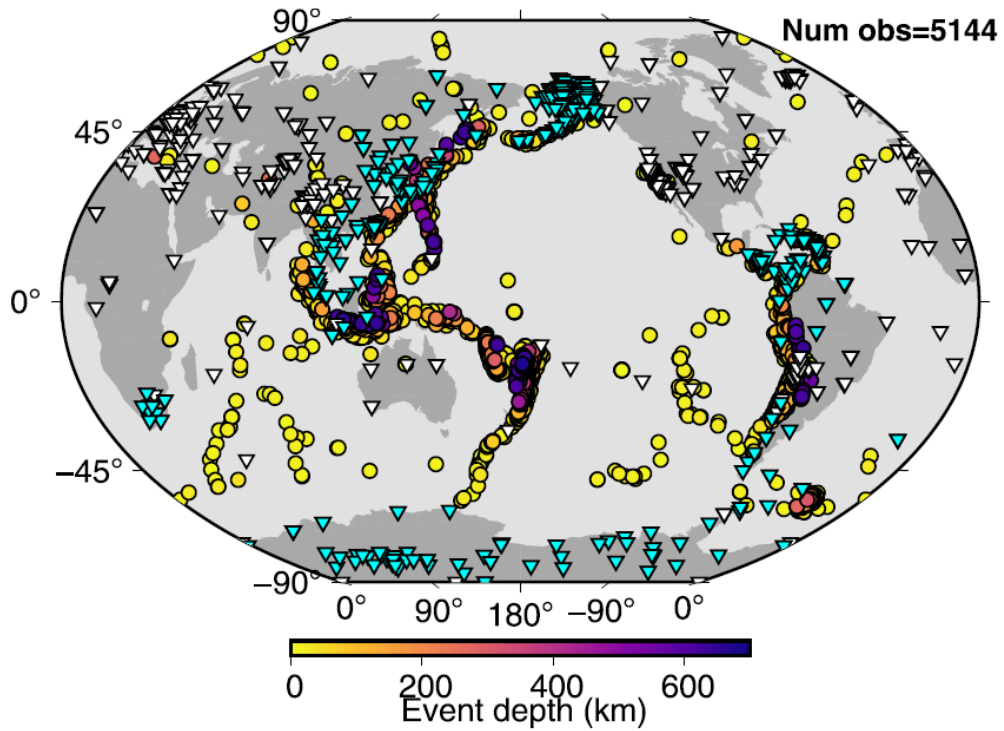
本文拓展数据可在 <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00761-w> 查到。

补充材料可在 <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00761-w> 线上版本中查到。

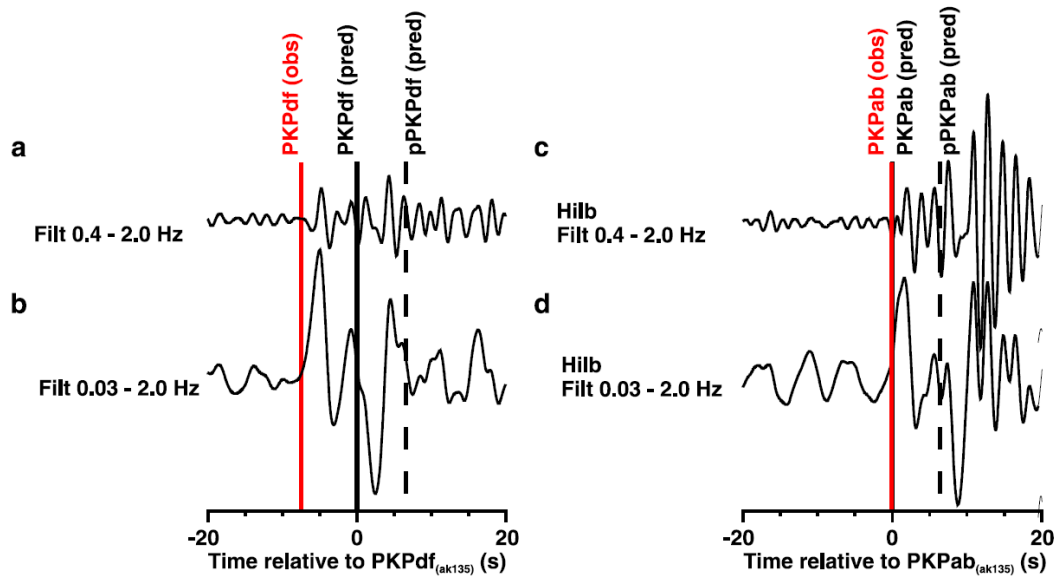
通讯和寻求材料可发邮件给 D.A.F.

预审信息。《自然地球科学》感谢匿名审稿人对此工作审稿做出的贡献。主要审稿编辑人为 Stefan Lachowycz。

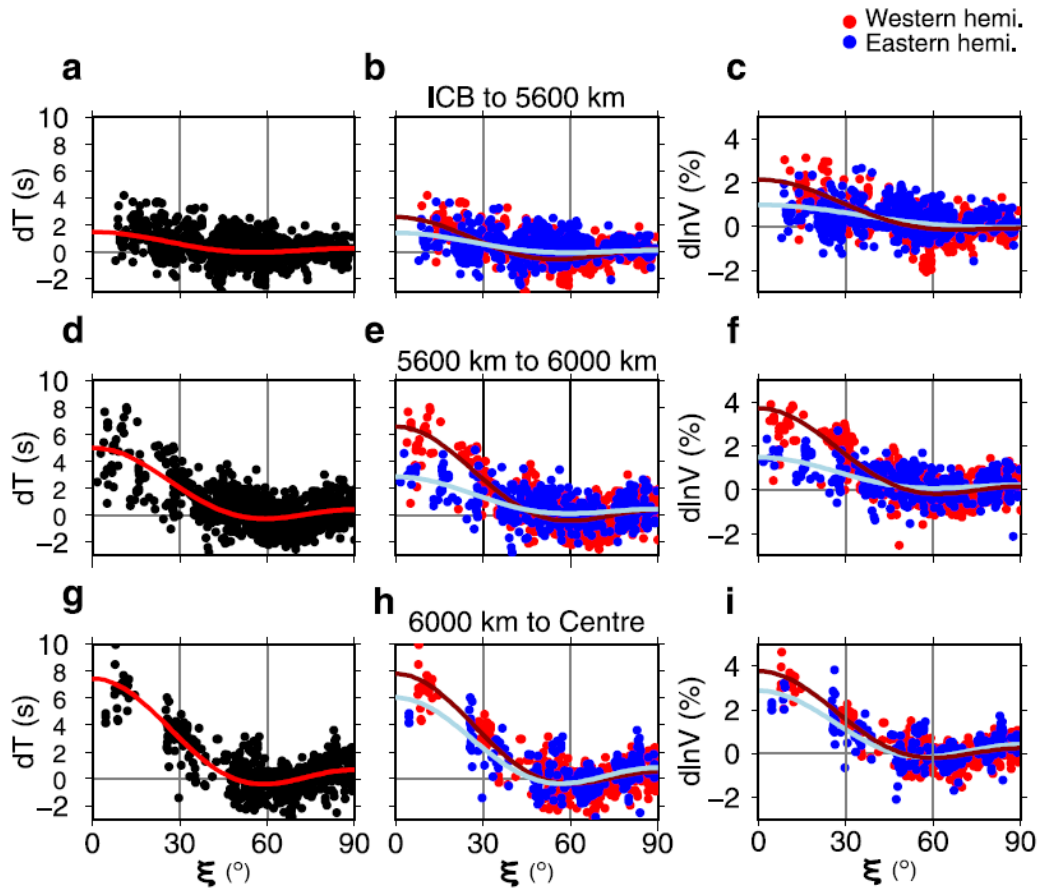
重印和许可信息可在 [www.nature.com/reprints](http://www.nature.com/reprints) 查阅。



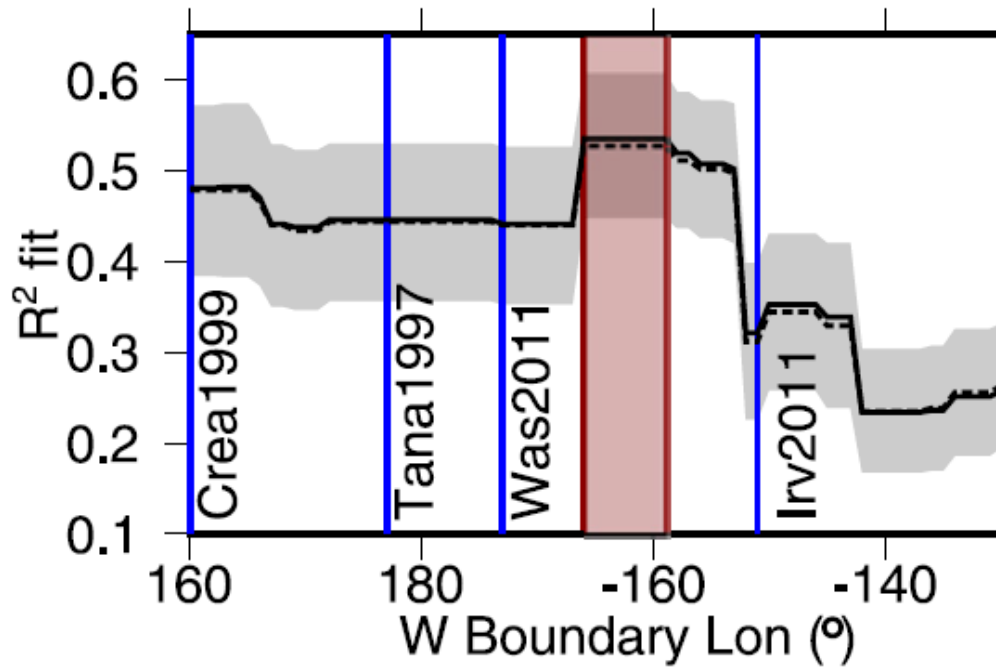
拓展数据图 1. 接收器来源分布。本次研究中使用的源和接收器分别用圆和三角形表示，新获得数据的台站用青色表示。



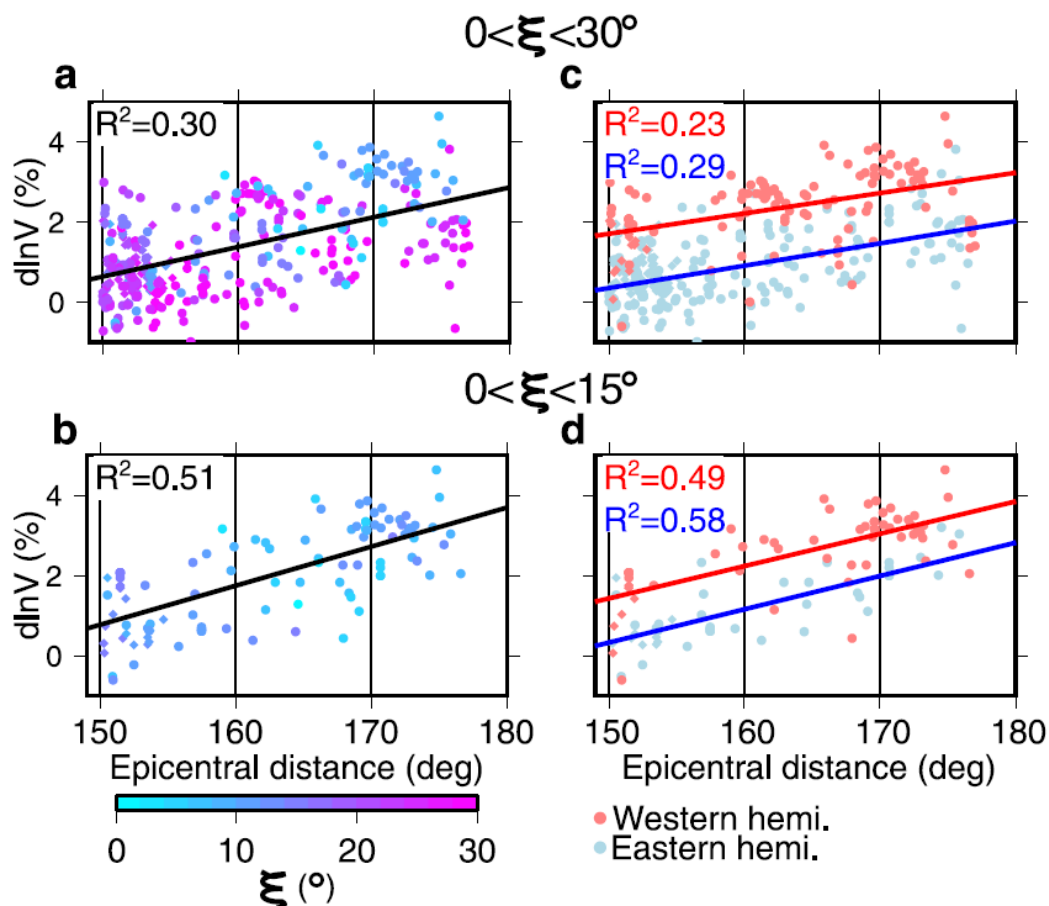
拓展数据图 2. PKP 微分走时测量。南极 P124 站在 2009 年 7 月 7 日观测到的巴芬湾 M6.0 地震事件(左)PKPdf 和(右)PKPab 的示例波形。波形按各自相位的预测到达时间排列。(a-c)展示的波形数据是 0.03-2 Hz 宽频滤波,(b-d)是窄带滤波 0.4-2.0 Hz。(c)和(d)是经过希尔伯特变换之后的波形数据。红线表示测量到时。用黑色实线和虚线展示预测到时(在模型 ak135 中带有椭圆度校正),黑色实线和虚线分别表示直接相位和深度相位,



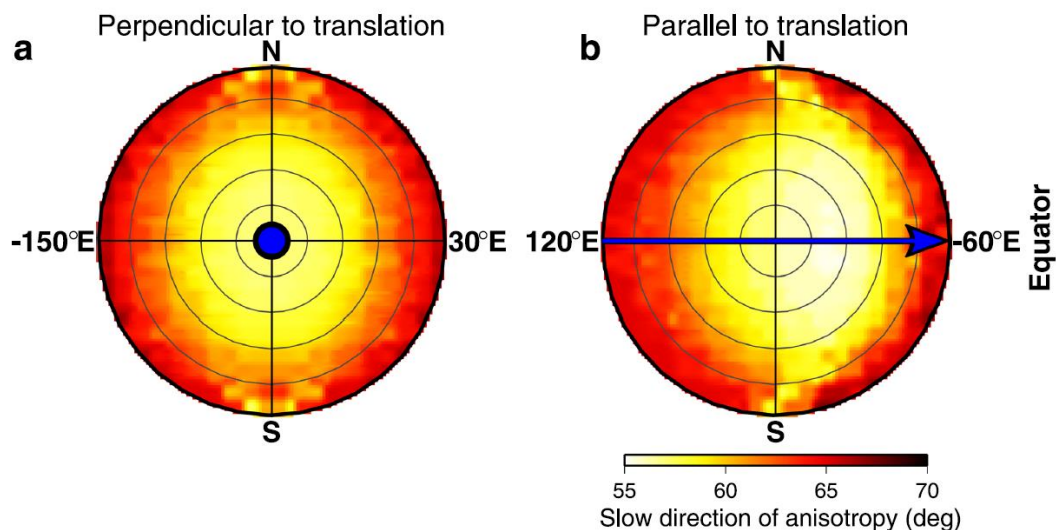
拓展数据图 3. 差分走时作为旋转轴角度 $\xi$ 和深度的函数。PKPbc-df 和 PKPab-df 走时异常和有效速度异常(不包括阿拉斯加站记录的数据)作为相对于旋转轴角度 $\xi$ 的函数, 由射线转折深度分为(a, b,和 c) ICB 到 5600 km, (d, e 和 f) 5600 km 到 6000 km,以及(g, h 和 i) 6000 km 到地心。(a, d, g):所有走时异常, (b, e, h)旅行时间异常分解为西半球(红色)和东半球(蓝色)的数据转变, (c, f, i)被半球分解的 IC 有效速度异常。WH 西部边界设为 159 °W, WH 东部边界设为 40 °E, 如拓展数据图 4 所示。



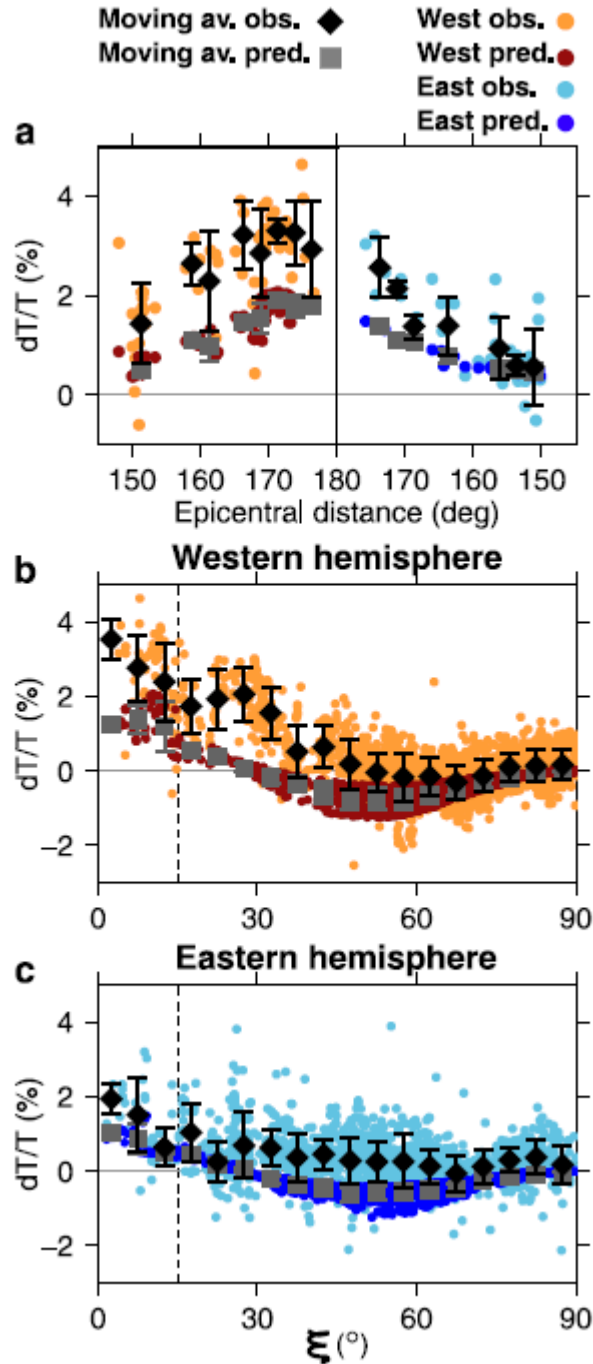
拓展数据图 4. 西半球的西边界。利用极区数据( $\xi < 15^\circ$ )并剔除阿拉斯加台站的数据, 计算出 WH 西部边界位置的最佳拟合, 黑色实线标记  $R^2$  拟合, 红色区域描述  $R^2$  最高的区域, 最有可能包含边界的位置, 它在  $166^\circ\text{W}$  和  $159^\circ\text{W}$  之间。  $R^2$  在  $< 166^\circ\text{W}$  和  $> 153^\circ\text{W}$  处急剧下降, 黑色虚线和灰色阴影表示 200 个 bootstrap 重采样的  $R^2$  值的平均值和标准偏差。根据 Irving(2016) 的结果, 东部边界固定在  $40^\circ\text{E}$ 。以往研究中的西部边界位置用蓝色标记: Tanaka & Hamaguchi 1997; Creager 1999; Waszek et al. 2011; Irving & Deuss 2011; 而 Lythgoe et al. 2014 在所示区域之外绘制。



拓展数据图 5. 有限速度异常和深度关系图。当 $\xi$ 范围在(a 和 c) 0 到  $30^\circ$ 和(b 和 d) 0 到  $15^\circ$ 时, IC 中的有效速度异常作为震中距离的函数。左图显示由 $\xi$ 着色的数据, 右图显示数据分为在东(蓝色)和西(红色)半球转向的数据。西半球定义为  $159^\circ\text{W}$  和  $40^\circ\text{E}$  之间, 如扩展数据图 4 中所述。对于大多数极坐标数据(c 和 f), 实线与距离的线性趋势特别明显, 表明各向异性随深度增加。



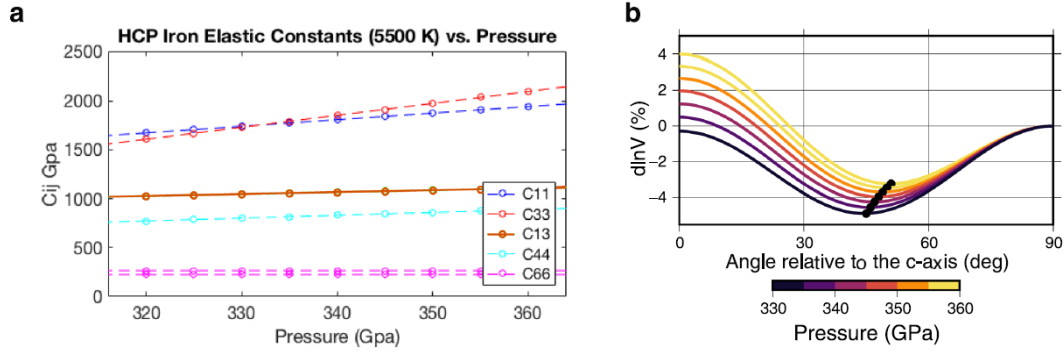
拓展数据图 6. 各向异性慢轴的分布。我们相应测量了最终模型中相对于(a)垂直于平移方向(蓝色箭头离开平面)平面中旋转(NS)轴中各向异性的慢方向, (b)平行于平移方向平面的旋转(NS)轴中各向异性的慢方向(图 3), 从图形的左(东)到右(西)的表示平移方向(蓝色箭头)。



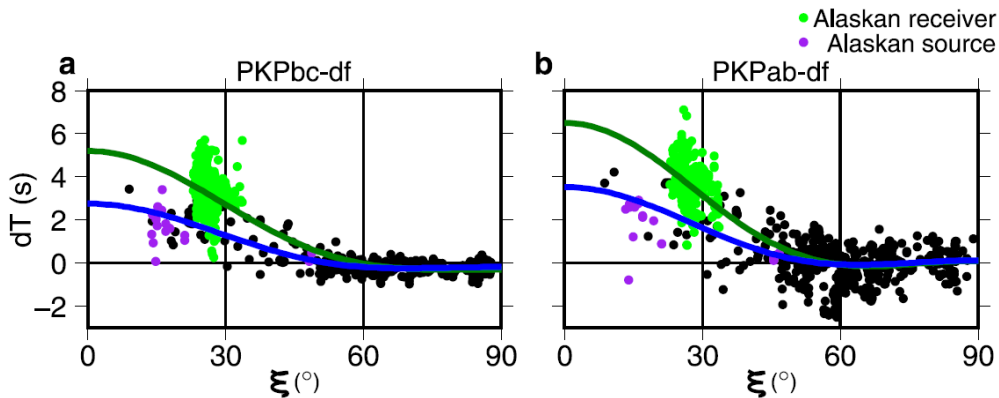
拓展数据图 7. 纯铁的 PKP 速度异常观测值与预测值。预测(深蓝色和红色点, 灰色方块平为均值)和观测(浅蓝色和橙色点, 黑色菱形为平均值)有效速度异常作为(a)  $\xi \leq 15^\circ$ 数据的震中距离的函数, b 和 c 中的虚线表示, 并作为(b)西半球和(c)东半球中 $\xi$ 的函数。数据的误差



条分别显示了面板 a、b 和 c 以 2.5° 和 5° 增量的平均值和一个标准偏差。我们使用了纯 hcp 铁晶的弹性张量，该铁晶处于 5500 K 和 360 GPa，其年龄为 0.5 Ga 以及超过 0.3 个 IC 年龄半径的平移率。与我们使用  $\text{Fe}_{93.25}\text{Ni}_{6.75}$  的模型的 93% 相比， $\xi < 15^\circ$  的数据方差减少了 73%。



拓展数据图 8. 压力对各向异性的影响。(a) hcp 铁的弹性常数作为压力的函数，从 360 GPa 和 5500 K 的参考位置计算得出，使用 5500 K 和 316 GPa 以及 5500 K 和 360 GPa 的多次计算结果外推。(b) 整个内核压力范围内的合成各向异性。最小速度异常的方向用黑色圆圈标记。随着压力的增加，最小各向异性的取向向较高  $\xi$  值方向移动(偏赤道)。



拓展数据图 9. 相对于模型 ak135，西半球数据在 ICB 450 公里范围内转动的微分走时异常，作为与旋转轴夹角  $\xi$  的函数。(a) PKPbc-df 和 (b) PKPac-df 相位对的走时异常表明阿拉斯加(绿色)台站的观测结果不符合全球模式，而阿拉斯加(紫色)源的观测结果符合全球模式。使用方程计算各向异性曲线。对于所有数据(绿色曲线)和除阿拉斯加记录的所有数据(蓝色曲线)来说，假设通过内核的 S1 具有恒定的圆柱形各向异性。