

Science: 四万两千年前的全球环境危机

摘要: 地质档案记录了多次地球磁极的倒转, 但地磁倒转对全球环境的影响仍不清楚。放射性碳校准的不确定性限制了对最近一次地磁极倒转 (被称为拉尚漂移, Laschamps Excursion, 41-42ka) 的潜在影响的研究。我们使用了古老的新西兰贝壳杉 (*Agathis australis*), 在拉尚漂移期间建立了大气放射性碳浓度变化的详细记录。通过精确地描述地磁倒转的特征, 并进行全球化学-气候模拟和详细的碳同位素定年古环境记录来研究其影响, 我们发现, ~42ka 地磁场强度最低值与太阳活动极小期相结合, 共同导致大气臭氧浓度和环流发生重大变化, 进而推动全球气候同步变化, 导致了重大的环境变化、灭绝事件和考古记录的转变。

地磁场近年来一直在逐渐减弱(在过去 170 年里大约减弱了 9%), 加之当前磁北极的快速移动, 地磁场倒转可能即将来临的推测甚嚣尘上。地磁倒转的经济影响主要为极端太阳风暴带来的暴露风险, 保守估计损失可达每天数十亿美元。研究地磁场极性变化影响的最好时期之一是拉尚漂移——发生在大约 4.1 万年前的一次相对较短时间 (<1000 年) 的地磁极性倒转。对沉积物和火山碎屑的研究表明, 在拉尚漂移时期, 地磁场的强度减弱到目前水平的 28% 以下, 值得注意的是, 在拉尚漂移发生前的转换阶段, 磁场强度只有现今的 0-6%(图 1)。

对格陵兰冰芯的研究未能揭示拉尚漂移对高纬度古气候的影响, 这一结果支持了当前的观点, 即地磁倒转与气候或环境变化之间没有关系。然而, 由于地磁场减弱, 到达地球大气层的太阳和宇宙辐射水平显著增加, 可能增加大气电离作用, 降低平流层臭氧水平, 因此对区域气候, 特别是低纬度地区气候存在潜在影响。就这一点而言, 值得注意的是, 太平洋盆地周围的许多环境记录似乎都在 4.0 至 4.2 万年期间发生显著变化(且通常是持续变化), 包括大洋洲和安第斯山脉出现的局部冰川最大值, 大气环流模式的长期变化, 以及澳大利亚大陆的干旱化和巨型动物的灭绝。同一时期在北美洲, 劳伦泰德冰盖(Laurentide Ice Sheet)从接近 4.2 万年的局部最小值开始迅速扩张。其中许多都记录了一个持续到全新世(~11.6ka)的进入冰期状态的长期相变, 这与大西洋盆地与冰期-间冰期事件相关的千年尺度突变和极端变化形成了直接对比。

尽管太平洋盆地环境变化的时间似乎与拉尚漂移时期大体一致, 但对地磁漂移确切时间和持续时间的缺乏研究, 目前尚不能确定磁极偏转是否对这些环境变化产生影响。此外, 由于到达高层大气的高能宇宙射线大量增加, 引起宇宙成因放射性核素 ^{14}C 和 ^{10}Be 的产量增加, 导致在陆地和海洋记录中拉尚漂移附近的放射性碳定年不确定性变得复杂。格陵兰岛和南极冰芯很好记录了 ^{10}Be 的高通量特征, 这些记录揭示了整个拉尚漂移时期长达一个世纪的 ^{10}Be 峰值的同步变化, 这些峰反映了一系列显著的太阳极小期(Grand Solar Minima)(低太阳活动, 类似于公元 1410 至 1540 的 Spörer 和公元 1645 至 1715 的 Maunder), 并且对气候的影响仍然未知。相比之下, 相关的大气 ^{14}C 变

化仍未有很好约束，因而无法进行精确校准。

拉尚漂移时期的放射性碳变化

本研究，我们对保留在新西兰北部湿地的古老贝壳杉树(*Agathis australis*)进行了详细的放射性碳分析，重建了覆盖整个拉尚漂移期的连续大气 ^{14}C 变化记录。我们比较了多个贝壳杉主干横截面的系列放射性碳测量值，以求在高分辨率的水平上识别大气放射性碳变化。在 Ngāwhā 恢复的一棵古树记录了 1700 年的连续变化，这一点尤为重要，因为它跨越了 ^{14}C 的最大变化时期，包括拉尚漂移发生之前的地磁场显著减弱时期。与现代贝壳杉和其它晚更新世贝壳杉相比，Ngāwhā 树的生长受到抑制，并且在地磁场强度最弱的时期树轮宽度显著减小。我们将贝壳杉树的 ^{14}C 数据嵌入到有 ^{230}Th 年龄精确限定的葫芦洞的 ^{14}C 数据中，以提供绝对时间标尺(图 1)。我们 40 年分辨率的 ^{14}C 重建(图 1)显示拉尚漂移之前和期间大气放射性碳的变化与虚拟地磁极的位置和地磁场强度变化非常匹配。贝壳杉-葫芦洞 ^{14}C 记录与古地磁强度数据的比较揭示，拉尚漂移时期的地磁场倒转(以及相关的部分恢复)发生在 41.56 至 41.05ka。

采用本研究贝壳杉 $\Delta^{14}\text{C}$ 记录模拟 ^{14}C 生产率，可以精确地与使用 ^{10}Be 标记的冰芯时间标尺保持一致。横跨整个时期，我们认为格陵兰冰芯 2005(GICC05)的时间尺度比葫芦洞的时间尺度(95.4%的范围：160 至 310 年)年轻 265 年(图 1)。相比先前的对比更加精确。值得注意的是， $\Delta^{14}\text{C}$ 在 42.35ka 开始急剧上升，在拉尚漂移倒转前 300 年的 41.8ka 达到峰值 782‰。这是迄今为止人类活动前放射性碳时间尺度内最高大气 ^{14}C 浓度值。 $\Delta^{14}\text{C}$ 峰值出现在地磁场最弱的阶段，并且与 ^{10}Be 通量记录的太阳活动极小期显著相关，在太阳活动极小期，减弱的太阳星际磁场导致增强的银河宇宙射线(GCR)向高层大气的输入。贝壳杉-葫芦洞的 ^{14}C 记录为这段时期提供了精确的放射性碳校准曲线，从而可以对更广泛的环境变化进行详细的校准，以验证事件之间的同步性，同时也使我们能够研究拉尚漂移时期的潜在气候驱动因素。

全球化学气候模型

为了探索显著减弱的地磁场对大气电离，化学和动力学的影响，我们使用全球化学气候模型(SOCOL-MPIOM)进行了一系列模拟。首先，使用现代地磁场偶极矩(M)和 800MV 的平均太阳调制势(f)的值(相当于现代值)对拉尚漂移前的全球条件进行建模。在经过 398 年的自旋加速后，分支了三个 72 年长度的模拟(从中使用最近 60 年进行分析)，以研究拉尚漂移和可能影响大气电离的另外两个太阳状态：对照组为 M=100%，f=800MV(实验参考值)；拉尚漂移组，地磁场减弱(M=0%，f=800MV；M0P800 实验)；拉尚漂移+太阳极小期组，地磁场减弱和太阳调制电位的减小大大提高了大气中星际宇宙射线的电离率(M=0%，f=0MV；M0P0 实验)。

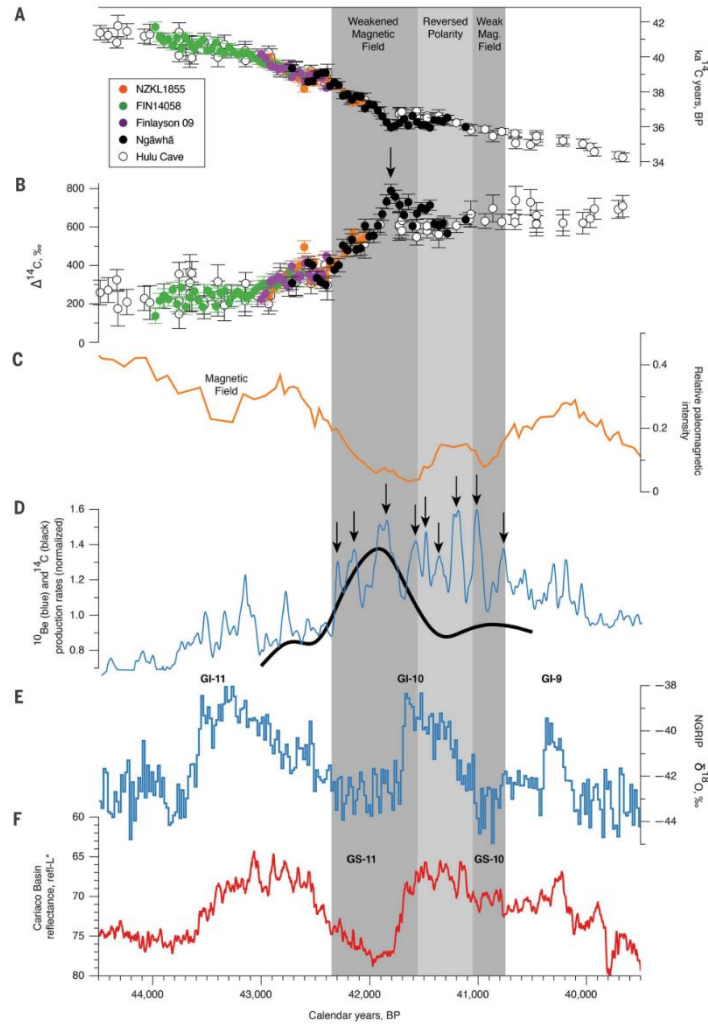


图 1 拉尚漂移期间的大气放射性碳浓度变化以及与关键环境数据的比较

A 和 B. 贝壳杉 ^{14}C 与 $\Delta^{14}\text{C}$ 在拉尚漂移之前和之后的值与葫芦洞记录的比较。箭头表示 $\Delta^{14}\text{C}$ 中的峰值与显著的太阳极小期的比较。42.20–42.04 ka 的 ^{14}C 稳定期出现在 ^{14}C 值增高的过程中，这与卡里亚科盆地的记录一致，并表明这是贝壳杉记录中一个重要特征。C. 黑海沉积物相对格陵兰冰芯记录的相对古强度曲线 D. 标准化的格陵兰 ^{10}Be 通量曲线（浅蓝色线）与贝壳杉-葫芦洞模拟 ^{14}C 曲线（黑色粗线）的比较。地磁场减弱时 ^{10}Be 峰的增高与太阳极小期电离辐射的增加一致。E. 北格陵兰冰芯计划 (NGRIP) 在 GICC05 (+265 年) 时间序列上的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录。格陵兰间冰期事件 11–9 以及较弱的格陵兰冰期 10 (GS-10)，这可能是一个格陵兰局部突然变冷的信号，中断了一个更大的格陵兰间冰期事件 (GI-10 和 GI-9)。F. 卡里亚科盆地的沉积物总反射率记录 (250 点运行平均值) 显示没有明显的 GS-10 信号。在极性反转 (浅灰色柱) 和两侧过渡 (深灰色) 阶段，过渡阶段是地球磁场最弱的时期，与 GS-11 和 GS-10 非常一致。

虽然我们对拉尚漂移(MOP800)期间地磁场减弱的模拟显示了大气化学和气候的适度但显著的变化，但拉尚漂移+太阳极小期(MOP0)的模拟显示了极为显著的影响，尤其是在北方冬季和南方夏季(12 月至 2 月)。我们的结果显示星际宇宙射线产生的大气电

离作用大大增加，导致氢氧和氮氧化物(HO_x 和 NO_x)的大量生成(图 2,a 和 b)，并可以在非常低的海拔发生。 HO_x 和 NO_x 浓度的增加影响了整个大气的臭氧水平，降低了平流层的 O_3 混合比($\sim 5\%$)，增加了对流层的 O_3 混合比($\sim 5\%$)，其中南极上空的变化最大($\sim 5\%$)。

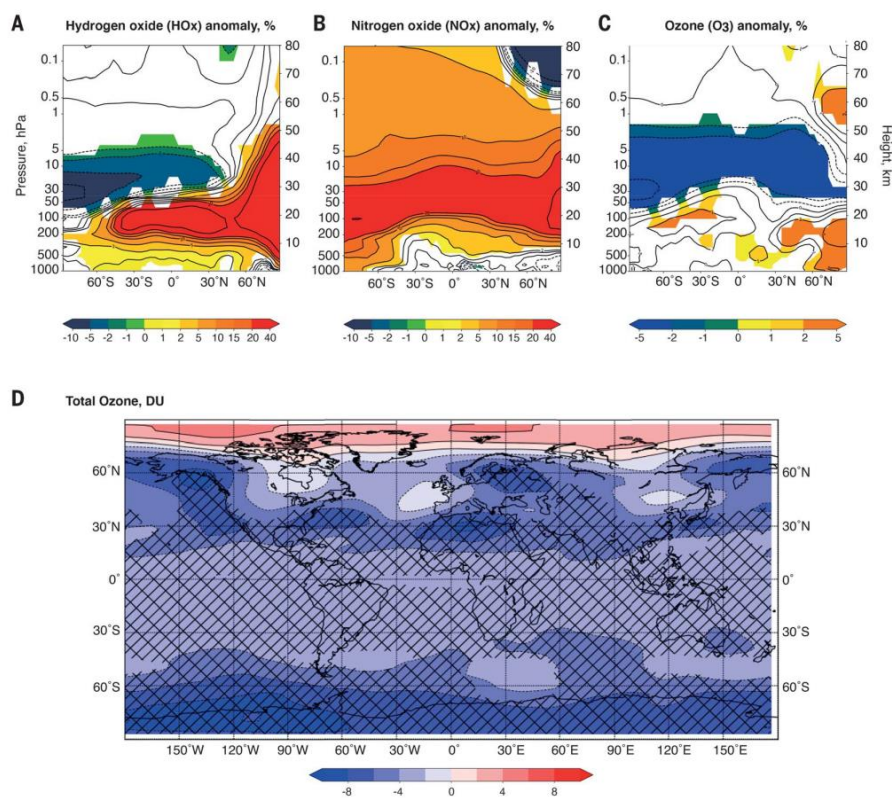


图 2 弱地磁场和太阳活动极小期对全球化学（气候）的影响

A-C. 在拉尚漂移期间地磁场减弱与太阳活动变小的 ($M=0, f=0$) 条件下，北方冬季和南方夏季大气化学(氢氧化物，氮氧化物，臭氧)的模拟异常；彩色区域表示 10% 的显著性。D. 臭氧总体变化 [Dobson 单位 (DU)]；阴影区表示 10% 的显著性水平。

我们发现平流层臭氧浓度的降低对两半球中高纬度地区的气候产生了影响(图 3)。在北半球，赤道到两极的温度梯度改变，北极的极地涡旋减弱，导致极地平流层的净变暖效应。我们假设，Brewer-Dobson 环流的增加进一步放大了这种正温度异常，导致气团绝热变暖，从平流层高处下沉到较低的高度。Brewer-Dobson 环流增加的原因可能来自于波状喷射流，在具有最明显地形障碍的北半球纬度达到更高的速度，并增加了重力波的产生，随后通过大气柱垂直向上传播。低层大气对这些因素的反应是：北极和北美上空的海平面气压升高，西欧上空的海平面气压降低，同时地表温度也发生相应变化。这些变化类似于北极涛动(AO)和北大西洋涛动(NAO)的负相位，这与再分析的研究一致。在南半球，平流层臭氧的减少似乎与中纬度气流(图 3)和亚热带降水模式的微小变化有关。由于显著性 $<10\%$ ，需要一个更长的模型来证实这一发现。

尽管有研究表明，冰期格陵兰岛的降雪主要发生在夏季，但北极冬季明显变冷的模型预测对格陵兰岛横跨这一时期的冰芯记录具有潜在的重要意义。值得注意的是，拉尚漂移期间地磁场强度最弱的两个时期与格陵兰两个冷的冰期 GS-11 和 GS-10 吻合(图 1)。此外，GS-10 和随后短暂的间冰期 GI-9 有许多类似非典型特性，导致它们可能属于一个较长但被突然变冷的事件分隔了的间冰期(图 1)。突然变冷事件可能与北大西洋海冰范围的扩大有关，导致中纬度和格陵兰岛之间气候梯度的改变。因此，拉尚漂移对气候的影响可能被格陵兰冰芯记录中它们的表现方式所掩盖。

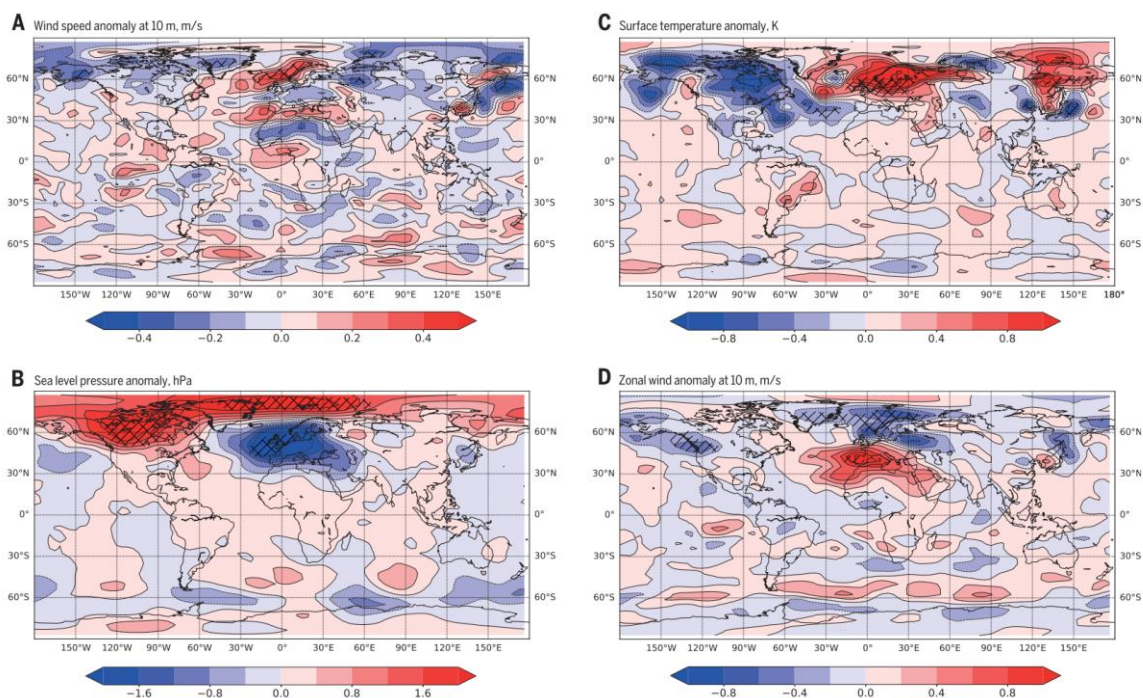


图 3 地磁场减弱和太阳活动极小期对全球气候的影响

A-D. 在拉尚漂移期间地磁场减弱与太阳活动变小的 ($M=0$, $f=0$) 条件下，北方冬季和南方夏季(相对于对照组)，风速，海平面气压，海表温度和纬向风变化；阴影区表示 10% 的显著性水平。

太平洋气候和环境影响

在北半球，仍然很难解释拉尚漂移对格陵兰岛的冰期-间冰期事件、冰期早期演化和解剖学意义上的现代人(AMHs)扩张的影响。因此，为了从这些混杂因素中分离出拉尚漂移的潜在影响，我们使用贝壳衫—葫芦洞放射性碳校准曲线对太平洋(大西洋海盆之外)从亚南极地区到热带的受地层限制地点的样带进行了检验(图 4)。

我们使用高分辨率放射性碳测年技术，在记录热带辐合带(ITCZ)(苏拉威西岛托乌蒂湖)和南半球中纬度西风带(亚南极地区奥克兰群岛)行为的地点，对拉尚漂移时期的沉积序列进行了研究。亚南极地区的奥克兰群岛(南纬 50 度)，目前位于南半球中纬度西风带之下。奥克兰群岛 Pillar Rock 地区的褐煤沉积层记录了最后一次冰期中 54 到 42ka 的温暖时期。在暴露的悬崖顶上的 *Dracophyllum* 灌木的花粉记录和来自新西兰大

陆的低地罗汉松森林花粉的长距离运输表明,西风比现在弱,年平均气温在 1-1.5° C,代表南半球西风的核​​心相对向两极倾斜的时期,向南大洋这一区域输送中纬度气团。12 个连续的 ^{14}C 年龄揭示了地层顶界年龄,标志着冰缘条件的回归发生在 $42.23 \pm 0.2\text{ka}$,与进入拉尚漂移前的过渡阶段磁场减弱相一致(图 1)。冰缘条件持续到全新世,表明南大洋该区域存在广泛的寒冷条件(与核心西风气流的加强或向北移动有关)。

在西太平洋赤道附近,由于热带辐合带向南迁移,托乌蒂湖 12 月至 5 月为雨季。在最后一个冰期,托乌蒂湖的 $\delta^{13}\text{C}$ 值保持着明显且持续的正向漂移(反映更干旱的条件),并一直持续到更新世-全新世边界。综合 13 个新的放射性碳年龄和沉积物磁性强度最小值,ITCZ 偏移发生在 $42.35 \pm 0.2\text{ka}$,同样发生在进入拉尚漂移前的过渡阶段,与 Pillar Rock 记录的西风气流变化精准一致。在托乌蒂湖和奥克兰群岛记录的主要气候界线上之所以能够获得高精度年龄,是因为对每个序列的连续放射性碳定年,可以与这一时期大气放射性碳值的急剧上升进行精确比对(图 1)。

上述变化与大量的观测结果一致,这些观测表明,在进入拉尚漂移前的过渡期,太平洋海盆周围发生了重大的环境变化。例如,南半球西风带的北移被认为可以解释干旱的中南部安第斯山脉中南部 39ka 之前的局部冰川扩张(图 4),可能与宇宙辐射通量和拉尚漂移有关。新西兰~42ka 发生的冰川最大化也与中纬度西南气流增强的气候模型一致。这些大范围的大气环流变化似乎产生了深远的影响。在澳大利亚大陆和塔斯马尼亚岛,巨型动物灭绝的高峰期出现在 42.1ka 左右(图 4),这通常被认为是人类活动造成的,尽管人类到达澳大利亚大陆已经超过 5 万年。相反,巨型动物的灭绝似乎与气候向干旱条件的明显转变是同时发生的,这导致了大型内陆湖泊的消失和植被类型的变化。在澳大利亚东北部林奇火山口,伴随植被燃烧增加的植被类型的变化发生于 $41.91 \pm 0.4\text{ka}$,与在托乌蒂湖和奥克兰群岛观察到的气候边界一致。同时,澳大利亚 Mungo 湖遗址的沉积物记录将澳大利亚内陆湖泊消失和大型动物灭绝与~42ka 的地磁漂移相对应(当地称为“Mungo lake excursion”)。在新喀里多尼亚以及南非,似乎也存在着类似的动植物变化。这些记录表明,中纬度气候变化和生物灭绝都与拉尚漂移时期的地磁转换期重叠,意味着这些事件存在相互关联。

我们的模型为认识拉尚漂移时期全球性气候变化提供重要参考。尽管与地磁倒转相关的直接影响很可能持续时间为 800 年,但许多上述同步变化持续了数千年。这意味着在一个或多个地球系统中跨越了一个阈值,从而进入了一个不同的持续状态(图 4)。一种可能是,随着地球的轨道结构趋向完全冰期状态,全球海洋环流受到限制,气候系统可能对拉尚漂移前后相对较短但极端的驱动变化十分敏感。例如,陆地和海洋沉积记录显示,北美劳伦冰盖从 42ka 的局部最小范围迅速扩大。地质记录和数值模型表明,在 39 至 37 ka,北美劳伦冰盖的某些部分可能已经扩大了 1000 公里以上。尽管我们的模拟并未显示赤道和南太平洋的气流有任何重大变化,但我们发现了减弱的极区涡流,特别是在北方冬季。北极涛动和北大西洋涛动负相有关地表温度的显著降低可

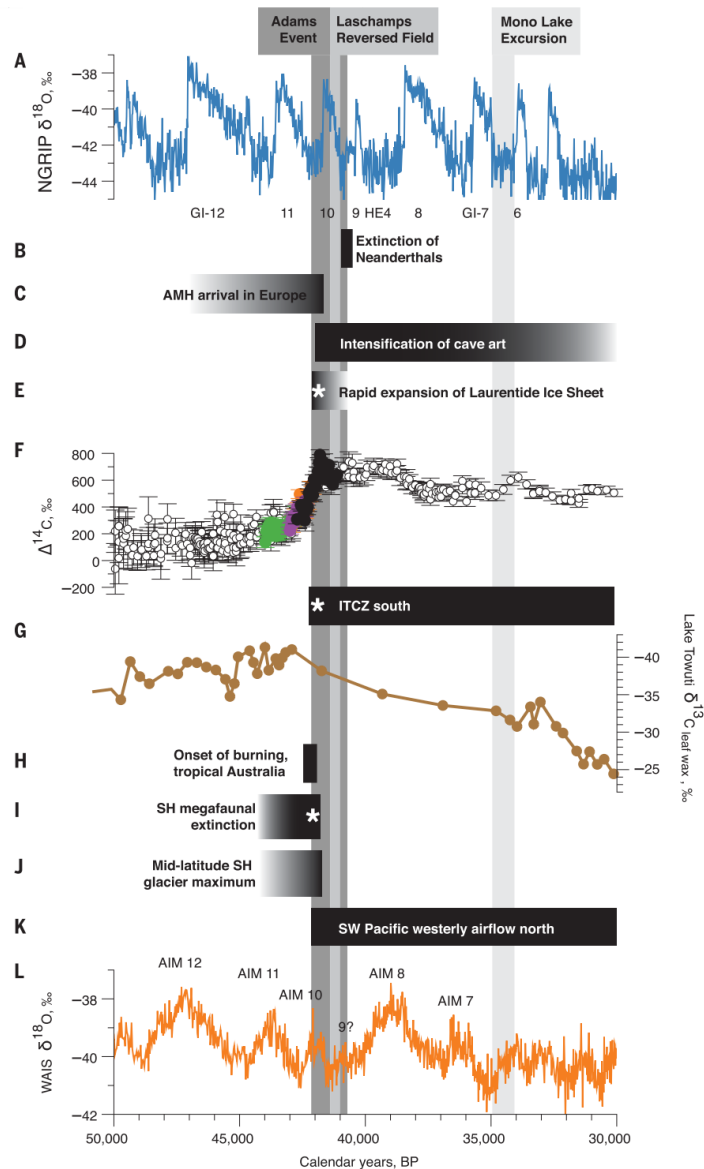


图 4 42 ka 亚当斯事件时气候和环境变化

A. 北格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线。HE4 为 GS-9 中的 Heinrich 事件。B 和 C. 用贝壳杉-葫芦洞曲线重新校准后，尼安德特人在欧洲的灭绝 (40.9 - 40.5 ka) 以及现代人到达欧洲和早期旧石器文化的发展。D. 欧洲和东南亚早期洞穴艺术和洞穴利用的出现。E. 劳伦泰德冰盖最小值后在 42ka 的迅速扩张发生在在拉尚事件之前或期间。F. 贝壳杉-葫芦洞曲线的 $\Delta^{14}\text{C}$ 值；彩色的实心圆圈表示单棵树；误差为 1σ 。G. 托乌蒂湖的叶蜡 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的热带辐合带 (ITCZ) 向南迁移。H. 澳大利亚热带昆士兰州开始出现野火燃烧。I. 澳大利亚巨型动物的灭绝 (和大陆范围的干旱化) 和非洲南部动物群的更替。J. 西南太平洋和安第斯山脉中部的局部冰川最大值。K. 中纬度西风带从奥克兰群岛向赤道的迁移与亚南极植物物种的可能灭绝 L. 南极西部 (WAIS) $\delta^{18}\text{O}$ 曲线。北格陵兰冰芯与南极西部在 GICC05 (+265 年) 时间序列上的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录。AIM, 南极同位素最大事件。拉尚事件显示为三个阶段：反极性 (浅灰色) 两侧的过渡阶段 (深灰色)。这里还显示了 Mono Lake 事件 (34.6 ka) (浅灰色)。星号表示与拉尚事件有关的地磁场变化的证据，表明全球有许多地方存在同步变化。

能为冰盖生长创造了积极条件，并降低了全球海平面。最近的工作表明，北美劳伦冰盖的扩大使得整个太平洋的大气环流重组。这种半球尺度对突然驱动的反应与由 Pillar Rock 研究和新西兰、澳大利亚和安第斯山脉中部的冰川行为揭示的南半球中纬度西风的同步运动相一致。

亚当斯地磁场过渡事件及其更广泛的意义

上述讨论表明，中低纬度~42ka 左右同时发生的气候和环境影响，与拉尚漂移之前的地磁场减弱是可以对应的。我们将其称为“亚当斯地磁场过渡事件”（以下简称“亚当斯事件”），由于时间(数字“42”)和相关的灭绝范围而以科学作家道格拉斯·亚当斯(Douglas Adams)的名字命名。前人研究未能确定拉尚漂移和气候影响之间的关系，是因为时间分辨率较低，并且侧重于地磁场倒转的时间(41.5 至 41.1ka)，而不是倒转之前更弱的地磁场阶段(42.4 至 41.5ka)。

亚当斯事件期间地磁场强度比倒转期更低，加之宇宙辐射强度的重大变化，导致大气电离和紫外线辐射水平的增加，特别是在赤道和低纬度地区($<40^\circ$)更为明显，因为宇宙射线截止刚度降低了 10 倍。在太阳活动极小期，考虑到太阳光谱的变化，平流层中部的电离和地表紫外线辐射水平进一步提高(分别比当前水平高 25%至 40%和 10%至 15%)。此外，在短寿命太阳高能粒子(SEP)事件期间，这些值可能更大(图 5)。尽管大气电离的增加与通过云种类型的影响造成的平流层和对流层云量之间的关系仍然不确定，但这种影响将集中在低纬度地区，低纬度较多的雷击可以解释在澳大利亚拉尚漂移时期木炭记录的增加，而与人类活动的考古迹象缺乏关系。

这项研究意义重大。例如，亚当斯事件在时间上非常接近全球广泛出现和增加的洞穴艺术、红色赭石手印，以及~40-42ka 的洞穴使用变化，例如在欧洲和东南亚岛屿(图 S34)。这种在全球范围不同地区突然的行为转变与亚当斯事件期间洞穴使用的增加或改变是一致的。在太阳活动极小期或短寿命太阳高能粒子事件期间，紫外线 B 可能达到有害水平，洞穴可能是躲避紫外线 B 增加的避难所，这也解释了赭石可能作为防晒霜的使用。因此，早期的洞穴艺术似乎代表了在一种新的媒介上对先前存在的行为的保存，而不是具象艺术的实际出现。在更广阔的拉尚漂移时期，其他重要的考古结果，包括尼安德特人的灭绝(在这里重新校准为 40.9 到 40.5 千年)，以及一些最初的欧洲现代人文化的消失和随后奥瑞格纳文化的广泛出现(图 4)。

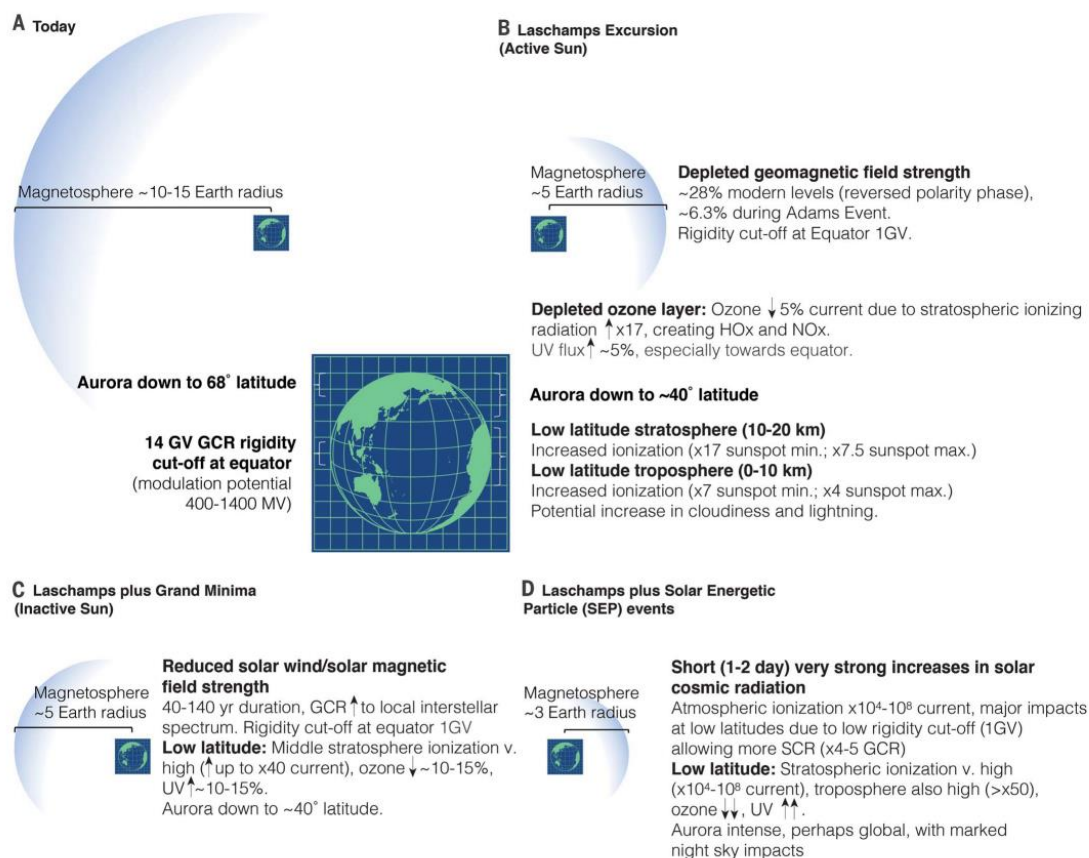


图 5 地球磁场和太阳事件不同状态潜在影响的总结。

A. 现今, B. 拉尚漂移期间, C. 拉尚漂移期间的太阳极小期, 和 D. 拉尚漂移期间的短寿命太阳高能粒子事件期间, 磁层大小、极光范围、大气电离和相关的化学和气候影响。向上的箭头表示增加, 向下的箭头表示减少。

亚当斯事件代表了一个先前未被认识的重要气候、环境和考古边界。此外, 另一个众所周知的地磁漂移, Mono Lake (34ka), 与葫芦洞石笋 $\Delta^{14}\text{C}$ 水平的明显峰值对应 (图 3), 并与托乌蒂湖记录的 ITCZ 进一步纬度变化以及欧亚大陆的一系列巨型动物灭绝密切相关。重要的是, 地磁过渡阶段的持续时间可能比拉尚漂移时期长得多。例如, 最近的一次完整的地磁倒转, 布容-松山极性倒转 (~790ka) 的过渡期为 ~20ka, 比亚当斯事件长约 25 倍, 具有潜在深远的全球气候和进化影响。地磁漂移可以通过宇宙辐射的急剧增加和臭氧浓度的下降来改变纬向温度梯度, 这一发现为古气候突变提供了一个新的模型。总体而言, 这些发现为深时地质记录中地磁场倒转和漂移的影响提出重要问题。

(翻译: 樊耘畅/地质地球所)