

地震科技前沿快报

2019 年第 7 期 （月刊 总第 7 期）

中国地震局科学技术委员会
中国地震科学实验场

中国科学院兰州文献情报中心
中国科学技术信息研究所

本期概要

- 1、新生代早期海洋缺氧状况扩大的氮同位素证据
 - 2、通过模拟地震震动数据评估美国中东部地区 2017 年地震灾害预测表现
 - 3、加州南部索尔顿海槽布劳利地震带的动态破裂情景
-

新生代早期海洋缺氧状况扩大的氮同位素证据

人们对于海洋氮循环的百万年变化依然知之甚少。在 57Ma 之前，三个沉积物岩芯的有孔虫壳结合有机物的 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比率 ($\delta^{15}\text{N}$) 很高，表明水体缺氧和脱氮作用的扩大。在 57-50 Ma 之前，北太平洋地区的 $\delta^{15}\text{N}$ 下降了 13~16‰，大西洋地区下降了 3~8‰。这一变化发生在全球降温之前，且与亚洲-印度碰撞的早期阶段相吻合。沿着特提斯海边缘形成温暖、含盐、中等深度的水体可能导致了缺氧事件的扩大，并伴随着碰撞结束而结束。50-35 Ma 之前， $\delta^{15}\text{N}$ 低于现在的值，表明在大陆架上广泛的沉积物脱氮。35 Ma 之前随着冰盖的增长，海平面下降，大陆架缩小， $\delta^{15}\text{N}$ 上涨。相关成果发表在 2019 年 4 月的 *Science* 上。

所有生物都需要生物可利用的 N (固定的 N)，并且固定的 N 通常还限制生物生产力。因此，固定 N 的循环与海洋中的碳和氧的循环紧密相关。蓝藻在地表水中对氮气的固定是海洋中固定氮的主要来源。主要的汇是反硝化作用。反硝化作用发生在海洋沉积物中，其速率很大程度上取决于有机质通量，以及温跃层和中等深度水体的 O₂ 亏损区域。

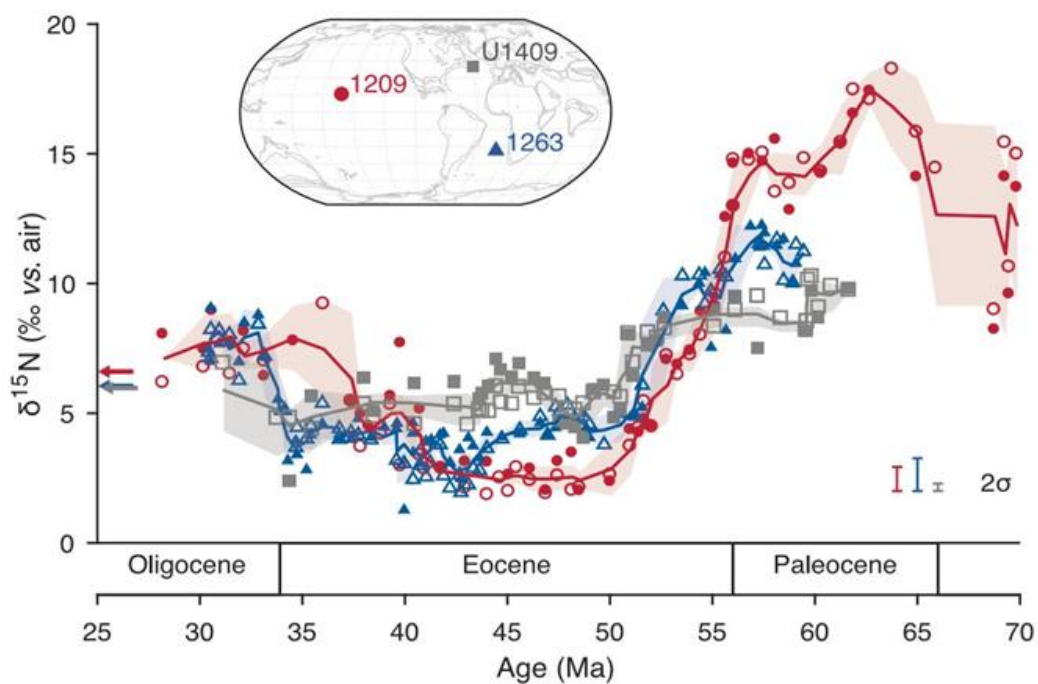


图 1 70-30 Ma 有孔虫壳 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化

鉴于水体的反硝化需要缺氧的条件，海洋中的 N 循环可能对地质历史时期海洋中的 O₂ 含量变化作出反应。在新生代时期，深海温度下降了 8~10°C，这将使 O₂ 在海水中的溶解度增加约 20%。海洋硝酸盐记录了海洋中输入的和输出的 N 同位素信号。N₂ 的固定产生了海洋中固定的 N， $\delta^{15}\text{N}$ 约为 -1‰。相比之下，水体的反硝化表现出对含 ¹⁴N 硝酸盐的强烈偏好，导致残留的硝酸盐在亚缺氧区内和附近的浅层地下水体中富集 ¹⁵N。

表层海洋中含氮生物量的产生由浅层的硝酸盐提供，这种硝酸盐反映了海洋平均硝酸盐的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 N₂ 固定的或水体反硝化的任何区域的同位素

痕迹。在完全硝酸盐消耗的区域，整个沉积物的 N 和有孔虫 N 都反映了浅层地下硝酸盐的 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化。与大量沉积有机质相反，有孔虫结合的有机物质被隔离在有孔虫壳壁的矿物基质内，并因此受其保护，使其在埋藏期间不易受同位素改变或外源 N 源污染。大量沉积物 N 含量和 $\delta^{15}\text{N}$ 的测量证实了 FB- $\delta^{15}\text{N}$ 对于数百万年沉积物记录研究的益处。在选择深度，通过分析选择的 FB- $\delta^{15}\text{N}$ 采集的有孔虫属，研究人员证实，混合分类群 FB- $\delta^{15}\text{N}$ 不受具有不同 FB- $\delta^{15}\text{N}$ 的分类群丰度变化的控制。

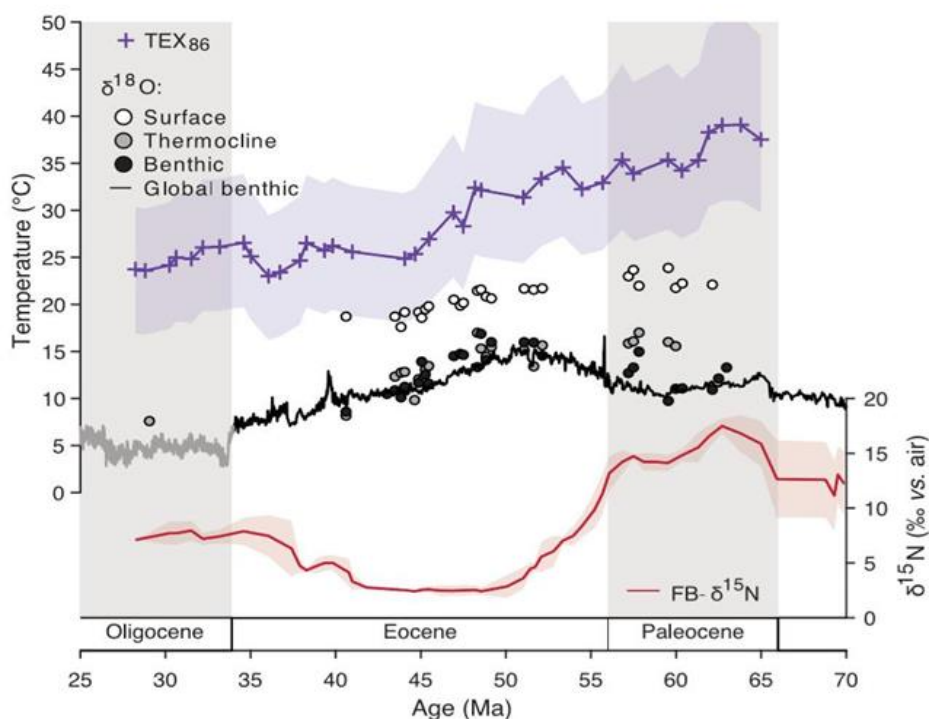


图2 北太平洋 1209 站点 FB- $\delta^{15}\text{N}$ 与温度变化的对比

研究人员分析了来自三个站点的 FB- $\delta^{15}\text{N}$ 记录：北太平洋，北大西洋和南大西洋各一个。这些站点的古地理位置表明，这些地区的特征都是表面完全硝酸盐消耗。因此，FB- $\delta^{15}\text{N}$ 应该反映浅层地下硝酸盐的 ^{15}N 特征。在所有地点，FB- $\delta^{15}\text{N}$ 在古新世至始新世早期都在减小。最大的 FB- $\delta^{15}\text{N}$ 下降发生在北太平洋的 1209 号站点：57-50 Ma 之前，FB- $\delta^{15}\text{N}$ 从 $>15\text{‰}$ 降

至 2‰。在南大西洋的 1263 号站点，变化发生的时间相似，但幅度较低，从 11‰到<5‰。位于西北大西洋的站点 U1409 显示了一个更小的变化，从 9‰到 5‰。经历中始新世相对稳定和低的 FB- $\delta^{15}\text{N}$ 之后，始新世晚期的 1209 和 1263 站点处的 FB- $\delta^{15}\text{N}$ 开始增加，渐新世达到 7~8‰。尽管在之前的大量沉积物研究中未观察到这些变化，但它们在在本研究中有限的大量沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 测量中很明显，尽管幅度较低且不如 FB- $\delta^{15}\text{N}$ 的变化明显。

在研究区域，古新世 FB- $\delta^{15}\text{N}$ 比核心顶部高约 5-10‰，表明古新世全球平均海洋硝态氮 $\delta^{15}\text{N}$ 较高。平均海洋硝态氮 $\delta^{15}\text{N}$ 主要反映了水体与沉积无反硝化的相对速率，海洋硝态氮 $\delta^{15}\text{N}$ 平均水平高表明高的全球海水反硝化速率或低沉积反硝化速率。这些站点之间的 FB- $\delta^{15}\text{N}$ 差异证实，古新世期间存在增强的水体反硝化作用。水体反硝化导致浅层地下硝酸盐 $\delta^{15}\text{N}$ 的空间梯度，并且可以解释在古新世期间相对于 1263 和 U1409 的 1209 的 FB- $\delta^{15}\text{N}$ 高值。此外，在这三个地点中，晚期古新世至早始新世 FB- $\delta^{15}\text{N}$ 的下降在 1209 地点最大，正如预期的那样，站点 1209 的硝酸盐供应的 $\delta^{15}\text{N}$ 下降与附近水体全球平均海洋硝酸盐 $\delta^{15}\text{N}$ 和区域硝态氮 $\delta^{15}\text{N}$ 的反硝化有关。这些研究结果表明，太平洋地区在古新世期间的水体反硝化作用与今天一样，但速度更快。

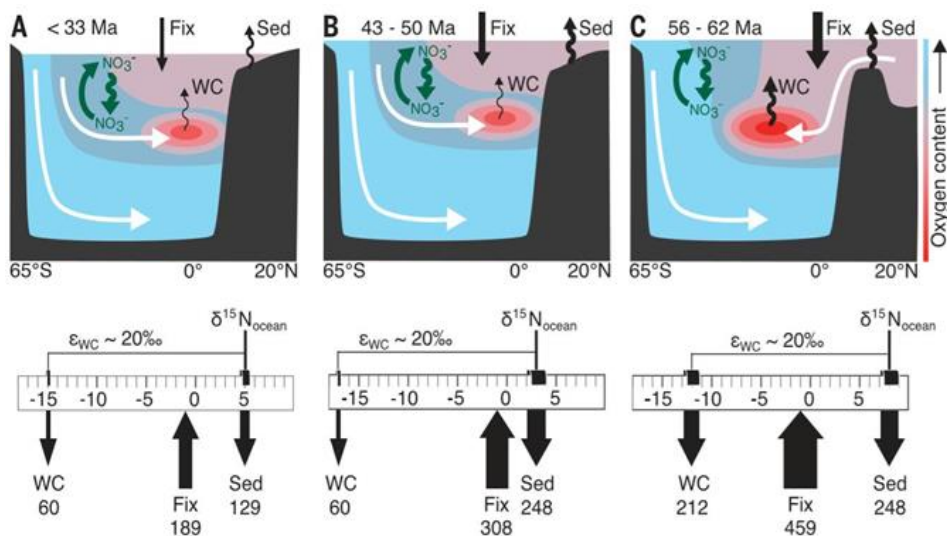


图 3 可能机制以及 FB- $\delta^{15}\text{N}$ 改变的 N 通量计算

升高的水体反硝化指向古新世海洋中更广泛的缺氧。两种机制可能增加缺氧：①输出量较高；②较低的起始溶解 O_2 浓度。并没有任何证据或有理由预期古新世的输出量增加。早新生代全球较为温暖的条件可能会通过降低 O_2 在地表水中的溶解度来减小 O_2 的活动。然而，如果全球气候是唯一的驱动因素， $FB-\delta^{15}N$ 和全球温度呈正相关，冷的气候环境导致 O_2 活动性降低，扩张性的缺氧将会下降，更少的水体会反硝化，从而降低 $FB-\delta^{15}N$ 。全球变暖可能促进了古新世的缺氧和反硝化作用。然而，时间的不匹配表明，只靠它本身并不足以引起这种变化。

在新生代期间，印度和非洲与欧亚大陆碰撞，特提斯海关闭，与 $\delta^{15}N$ 开始降低同时发生。研究人员认为，在这些浅海中形成温暖、咸的地下水，这些低 O_2 活动性的水引入全球海洋的温跃层或中等深度水域，扩大缺氧，从而扩大水体反硝化作用。研究人员认为，伴随特提斯海关闭的变化有效地结束了温暖、咸、低 O_2 活动性的特提斯海水对海洋温跃层和中间深度的交换。这可能是由于形成特提斯水所需的大陆架环境的丧失。在任何一种情况下，这种失去的低纬度源都将被更冷的源替代，因此更富含 O_2 的高纬度源区在今天占据主导地位。

研究人员预测，温跃层和深海之间的温差应该从古新世到早始新世下降，因为温跃层水源从温暖的咸特提斯水变为较冷的高纬度海洋表面水。底栖有孔虫 $\delta^{18}O$ 记录了 57-50 Ma 之前的深水变暖，其中来自站点 1209 的 TEX86 数据表明 SST 从约 62-30Ma 之前持续下降，与深部和表面温度从 57-50Ma 之前的收敛是一致的。在 $FB-\delta^{15}N$ 下降的时间内，太平洋温跃层和中等深度水源从较温暖的低 O_2 活动性源变为较冷的、较高 O_2 活动性源。来自站点 1209 的浮游有孔虫 $\delta^{18}O$ 的测量证实了这种解释，来自浮游有孔

虫的不同分类群的额外证据表明，在温跃层深处向深海温度的收敛大于在表面处的收敛。

在始新世-渐新世过渡期，大西洋和太平洋的 $\text{FB-}\delta^{15}\text{N}$ 增加了 4~5‰。这表明，平均海洋硝酸盐 $\delta^{15}\text{N}$ 的增加没有加强区域硝酸盐 $\delta^{15}\text{N}$ 梯度，因此是沉积而不是水体反硝化作用的变化。始新世-渐新世过渡的特点是南极冰盖的扩张，全球海平面的降低以及淹没大陆架面积的减少。研究人员认为， $\text{FB-}\delta^{15}\text{N}$ 在始新世 -渐新世增加是由于这种冰盖生长引起的陆架沉积反硝化作用的下降。

上面提到的 $\text{FB-}\delta^{15}\text{N}$ 记录表明，水体通量和沉积反硝化作用发生了很大变化。研究人员使用简单的稳态同位素质量平衡计算来进行海洋固定 N 输入和输出变化的潜在规模的一阶估计。从大西洋记录的平均值得出平均海洋硝酸盐 $\delta^{15}\text{N}$ ，并假设渐新世 N 通量与现代相似。该计算表明，始新世和古新世的全球沉积反硝化速率几乎是渐新世的两倍，古新世水体反硝化速率比渐新世和始新世高 3.5 倍。估计古新世期间净全球海洋反硝化速率是现代的两倍多。反硝化作用的增加需要在古新世期间补偿增加 N_2 固定，以防止海洋在几千年内失去固定的 N。目前，尚不清楚这种平衡是否在类似于现代海洋的 N 储层规模上发生。今天，在固定 N 向地表水的年供应中， N_2 固定通常不如地下硝酸盐重要；在古新世，较高的固氮速率将使这两个供应更具可比性。

研究人员对早期新生代 $\text{FB-}\delta^{15}\text{N}$ 的研究表明，构造通过对海洋环流的影响，可以大大改变全球生物地球化学。在过去的灭绝事件和未来的全球变暖中，海洋氧气的减少已被认为是生物和地球化学变化的驱动因素。海洋环流影响温跃层和中等深度水的氧含量，部分程度上通过指示水的源区，

从而指示其温度和起始 O₂ 浓度。在新生代早期，海洋环境在调节海洋内部的 O₂ 消耗和反硝化作用方面似乎比全球平均温度更重要。

来源：Kast E R, Stolper D A, Auderset A, et al. Nitrogen isotope evidence for expanded ocean suboxia in the early Cenozoic. *Science*, 2019, 364(6438): 386-389.

通过模拟地震震动数据评估美国中东部地区

2017 年地震灾害预测表现

由于非常规油气开采导致的废水注入，美国中东部地区经历了显著的地震增加。为了了解 2016 年天然和诱发地震情况，美国地质调查局构建了一年地震灾害模型。结果显示，第一年模型结果表现很好，在观察到的和期望的超出数之间以及观察到的和预测的震动之间都有较好的匹配。而当用“你感觉到了吗”（Did You Feel It, DYFI）数据评估模型 2017 年的表现时，来自美国西北大学地球与行星科技研究所和统计所的科学家发现模型表现较好，但是已经不如 2016 年。通过模拟地震震动发现，在灾害模型的假设合理的情况下不太可能导致模型效果变差，因此 2017 年模型表现力降低可能是由于废水注入速率的降低导致的，这对于以后模型的改善具有重要意义。相关成果发表在 2019 年 5 月的 *Seismological Research Letters* 上。

从 2008 年开始增加的非常规油气生产导致美国中部和东部（CEUS）地震活动显著增强，在俄克拉何马州及其周边区域尤为明显。而地震活动的增加意味着灾害的增多。因此美国地质调查局开展了一系列用于一年的灾害预测模型。利用 DYFI 实际观测的地震数据与模型预测数据比较发现，第一年（2016）年模型表现很好，无论是在整个 CEUS 还是在诱发地震强烈的俄克拉何马州，观测值和预测值匹配较好。目前需要进一步对模型在 2017 年的表现做出评估，并分析导致表现发生变化的原因，从而为模型的改善提供合理的依据。

为了评估 2017 年一年地震灾害预测模型的表现，研究者首先利用 DYFI 数据库中震动记录数据与模型预测地震数据进行比较，并通过两个指标参数进行定量化分析，分别为 M0 和 M1。M0，分数超标指标（fractional

exceedance metric) 定义为:

$$M0(f, p) = |f - p|$$

其中 p 是预测最高震动超过模型预测的站点的组分, f 是观察到实际发生的部分。在地图上的任何一点, 超出的概率由指数分布给出:

$$p = 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{T}\right)$$

对于一年观察模型, $\tau=1$, 模型假设返回周期 $T=100\text{yr}$, 因此 $p=0.01$ 。而 $M0$ 在地震灾害分析中是不明确的, 它只能给出观察值是大于还是小于预测值。 $M1$, 平方误差指标 (squared misfit metric) 定义为

$$M1(s, x) = \frac{1}{N} \sum (x_i - s_i)^2$$

x_i 和 s_i 分别是每个点的最大观测震动和最大预测震动。 $M1$ 能够衡量预测值和观察值在空间上的匹配程度。对于完美的模型两个指标的值都等于 0, 也就是说两个指标的值越大, 预测模型的表现也就越差。

为了分析模型表现变化的原因, 研究者最后又利用 Monte Carlo 模拟对俄克拉何马州地区分析震动响应减少的原因。当年地震的数量是由前两年加权平均得到的, 权重分别为 0.8 (去年) 和 0.2 (前年)。震级是由古登堡-里克特关系 (Gutenberg-Richter relationship) 获得的:

$$m = -\frac{1}{b \ln(10)} \ln U + m_0$$

m 表示震级, 模型的 b 值在这等于 1, U 是由 $[0,1]$ 上的均匀分布随机获得的, 最小震级为 2.7。

DYFI 数据以及模型表现

图 1 展示了预测图的整体表现, 在 17391 个响应点中, 只有 501 个观测值超过预测值。 $M0=0.0188$, $M1=5.39$, 相对较低的数值反映了 DYFI 数据记录的最大震动和预测值之间合理的空间联系。2016 年该模型的

$M_0=0.0073$, $M_1=4.62$ 。尽管 2017 年的结果较去年稍高，不过依然是较为理想的。预测地震强度较高的地区(>VII)观测到的震动强度范围在 II-VIII。预测地震强度在 III-V 之间的地区也有显著的结果。而预测地震强度在这之间的地区观测结果往往更低。在观测值大于预测值的地区（超标，*exceedance*），在图 1 中集中分布在对角线附近，表明这种超标是很小的。

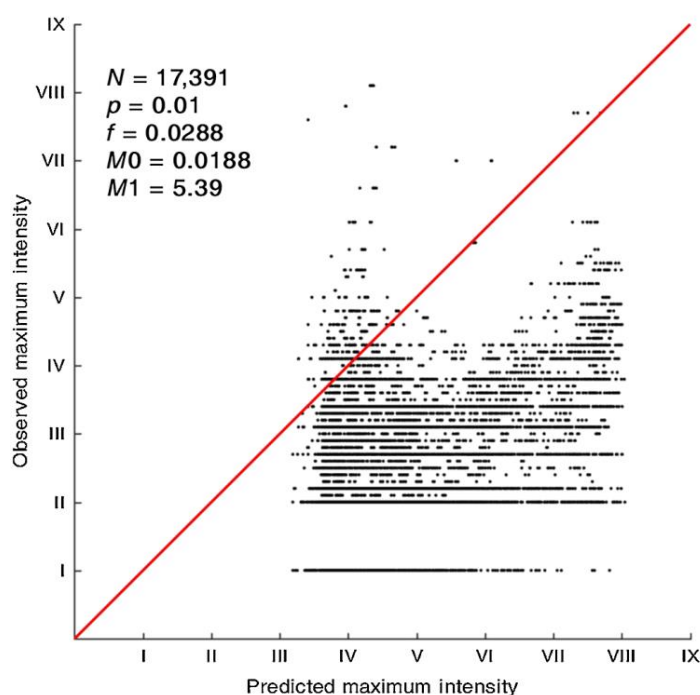


图 1 2017 地震灾害预测模型预测最大地震强度和实际观察地震强度比较

对于俄克拉何马州地区，数据点绝大部分落在对角线以下，表明大部分地点地震强度观测值要小于模型预测值。 $M_0=0.0077$ ，和 2016 年的相似 ($M_{0OK}=0.0069$)，但是 $M_1=10.46$ ，要比 2016 年的大很多 ($M_{1OK}=5.01$)。俄克拉何马州地区的这种“高估”，可以在除去该地区的情况下得到很好的体现。图中缺少在较高的预测最大强度下发生的超标，因为由于诱发的地震活动而具有最高预测震动的区域从地图中被去除，相应的多了具有低预测强度地区的超标，主要是蒙大拿地震和特拉华地震。移除 M_0 有所增加，

但是更加准确反映模型误差大小的 $M1$ 减少到 4.16，表明除去俄克拉何马州地区模型的表现有所提高。

对蒙大拿地区来说，由于其发生了未曾预料的大地震，导致该地区很多地点观测值要大于预测值，超过 20%的地区出现超标。 $M0=0.2063$ ， $M1=1.98$ 表明模型具有较好的变异性。对于东部地区，其发生的地震主要是非诱发地震。 $M0=0.0177$ ， $M1=2.97$ ，同样表明了模型的良好表现。

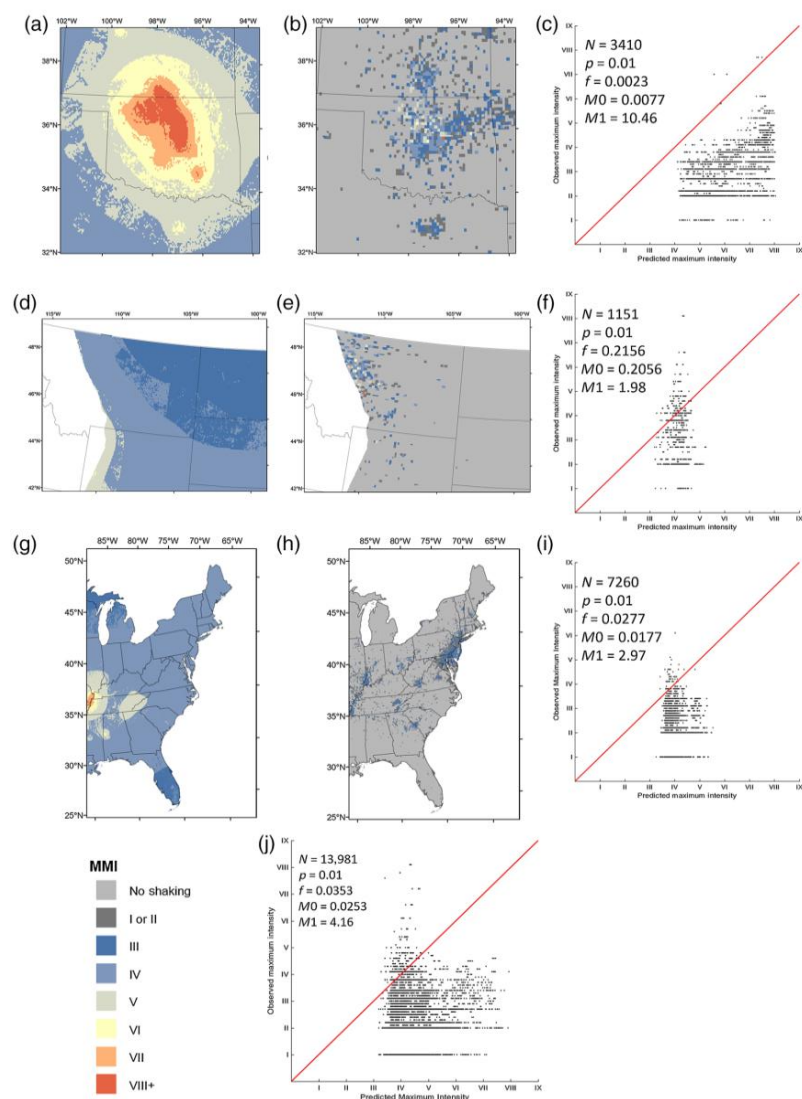


图2 预测 (a,d,g) 和观察 (b,e,h) 震动图及预测-观测震度对比图 (a-c:俄克拉何马州地区;

b-f:蒙大拿地区; g-i:美国东海岸; j:除了俄克拉何马州地区的整个美国中部和东部)

震动模拟

(1) 无约束模型。在这个模型中地震数量、震级、位置以及地表运动不确定性均为变量。结果显示 M_0 一般较小，即 f 约等于 p 。尽管最大可以达到 0.8，但是大部分都小于 0.02。总体上讲基本符合 DYFI 2017 年数据 ($M_0=0.0077$)。而 M_1 基本符合均值为 2.09 的正态分布，这与 DYFI 2017 年数据相差较大 ($M_1=10.46$)。这种差异可以是因为 DYFI 数据的不完整性，例如俄克拉何马州地区 2017 年很多相对较大地震在 DYFI 数据中没有得到响应，而邻区的响应也比预测的要小得多。因此 DYFI 数据的响应速率可能还存在一些问题，其会导致不协调甚至错失响应。

(2) 约束模型。在约束模型中，地震数量、震级以及位置按照 2017 年发生的进行设置，只考虑地表运动的不确定性。结果显示 M_0 主要分布在 0.08~0.1 之间，这和无约束模型差异较大。 M_1 的分布符合标准差更大 (0.48) 的正态分布，均值为 2.33。

(3) 两者的比较。本可以期望准确预测地震的模型的 M_0 和 M_1 能够落在完全无约束模型的范围内，但是将约束模型中数据 50% 和 80% 等值线显示在无约束模型中时，两者几乎没有重叠部分，无论是 M_0 和 M_1 都要比无约束模型大。也就是说 2017 年地震灾害预测模型表现较差的原因可能是基础假设有缺陷。地震震动的物理特征并没有被准确表示出来，否则可以期望看到两者的重叠。具体来讲，可能是由于 2017 年很少有较大的地震发生从而无法产生超标。较大的地震能够同时减少 M_0 和 M_1 。而缺少大地震导致 DYFI 数据的不完整性，影响其数据质量。

总体而言，2017 年地震灾害预测模型表现良好（稍不如 2016 年），但是对震动的预测整体偏高 (over prediction)，这和 2016 年有显著区别 (2016 年发生了多次大地震)。对于其表现变差的原因可能是由于大地震的减少。而研究表明，废水注入速率和地震震级有很大相关性。尽管在废水注入停

止后地震会持续进行，但是震级会显著减小。俄克拉何马州地区大地震减少的原因可能是因为监管和油价等因素导致的废水注入速率的减小。因此将废水注入速率及地点考虑在地震灾害预测模型的修改和完善中可能会得到更好的预测结果。

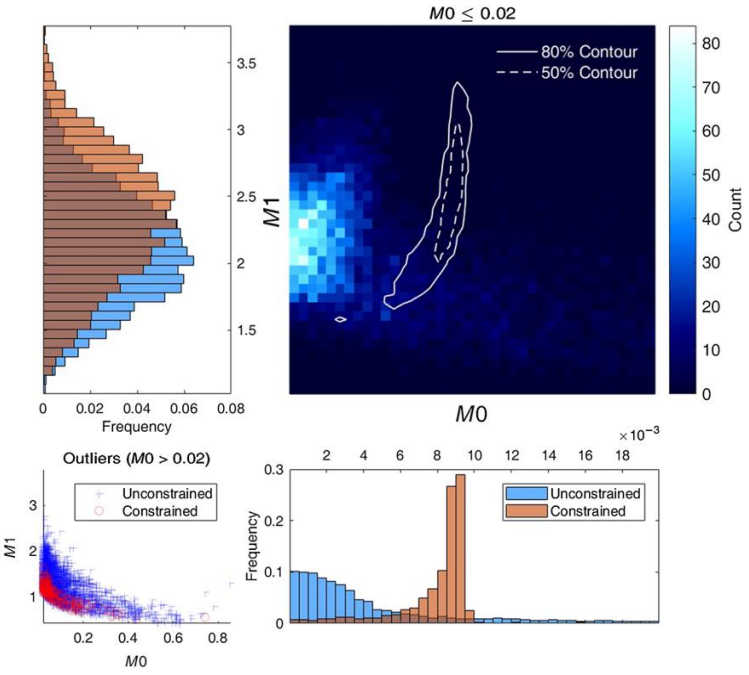


图3 无约束（背景热图）和约束模型（白色等高线）的叠加

来源: Edward M B, James Neely, et al. Assessments of the Performance of the 2017 One-Year Seismic-Hazard Forecast for the Central and Eastern United States via Simulated Earthquake Shaking Data. *Seismological Research Letters*, 2019, 90(3):1155-1167.

加州南部索尔顿海槽布劳利地震带的动态破裂情景

研究人员分析了加利福尼亚南部布劳利地震带（BSZ）中相互连接的断层系统的动力学行为。断层系统包括南部圣安德烈斯断层（SSAF），帝国断层（IF）以及 BSZ 中的一组交叉断层，这些交叉断层可以作为两个较大断层之间的连接结构。地质和地震证据表明，SSAF 和 IF 可能有埋藏的延伸部分，将它们连接在一起，BSZ 中的交叉断层在它们之间切割。这样的结构提出了一个问题：在这个区域内破裂是否可能一步一步穿过，导致大的板块边界尺度的地震。研究人员通过三维动态有限元自发破裂模拟研究了该地区的潜在地震，结果发现，在关于断层应力和断层几何形状的多种假设下，从北到南和从南到北都可能发生贯穿性断裂。两个因素促进了交叉断层的活动：主要断层之一没有破裂，主断层与交叉断层之间的初始应力形成反差，导致主断层传播速度慢，同时，交叉断裂保持容易破裂的状态。在破裂过程中，破裂传播和滑移的模式受到断层间动态应力相互作用的强烈影响。这一发现可能对该区域的潜在地震以及几何复杂/分支断层的动力学认识产生影响。相关研究成果于 2019 年 4 月发表于 *Geophysical Research: Solid Earth*。

IF 和 SAF 之间的跨越区被解释为一系列扩张中心的最北端，从加利福尼亚湾的海底扩张一直到加利福尼亚南部的大陆转换断层。在这一段中存在晚第四纪火山活动。在这个最北端的一段中，只有很少的晚第四纪火山活动没有真正的海底扩张。相比之下，该段存在高水平的微震活动，同时也包括 BSZ。包括整个 BSZ 在内的跨越区段位于古老的 Cahuilla 湖的海岸线下方，并且在过去的一千年中一直被淹没，最近的淹没大约发生在 300 年前。因此，年轻的沉积物埋藏了区域内大多数断层的物理表达，除了 IF 和 BF，这两个断层都在 1940 年和 1979 年持续破裂。这种地表现象的缺乏导致对实际结构的理解不足，其中许多只是从与地震群相关的微地震活动中推断出来的。研究人员根据 1940 年和 1979 年地震中的破裂、与 BSZ 微

震的线性关系、索尔顿海下的断层成像，以及结合前三者的观察构建出的三维模型，推测可能的断层位置。

BSZ 及其与 SSAF 和 IF 的潜在相互作用是区域地震危险的重要原因。同时，这个几何复杂区域可能是一个自然的实验室，可通过一系列分支中间断层来研究次平行但未重合的断层系统之间滑移转换的动力学特征。研究人员假定的断层几何形状涉及多个断层分支，为了研究这种几何复杂断层系统的潜在地震行为，研究者转向三维自发动态破裂模拟。这些模型将断层几何形状、物质和摩擦特性、摩擦定律的函数以及推断的应力场作为输入值。与运动断层模型不同，破裂和滑移的演化是模拟的计算结果，而不是初始假设。这种类型的建模的一个优点是它允许人们确定输入参数的可变性如何影响最终的地震。这种方法可以让人们研究过去地震中发生的物理过程，也可以预测给定断层系统潜在的未来地震行为。而第二种应用是当前工作的重点。

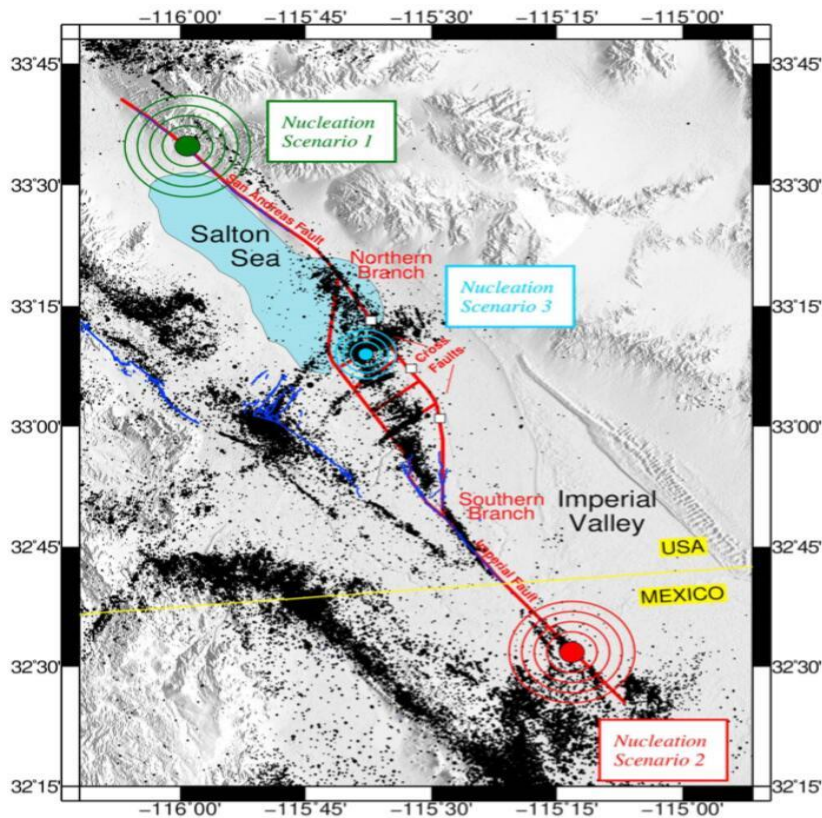


图 1 断层形态和成核情景

分支断层的动力学已经详细研究了多年，人们特别关注如何确定哪个区段地震在分支上成核后将维持破裂。在二维动力学模型中，在断层分支处，破裂可以在主断层上进行，或者它可以传播到分支断层并在主断层上消亡，或者它可以同时在两个分支断层上传播。动态应力场由同震破裂历史决定，特别是包括分支断层附近的破裂速度。许多动态模型的关键结果表明，人们对分支断层处应力场性质的假设可以控制分支处断裂的动力学特征。

将复杂的断层网络实现为有限元模型需要使用高级几何生成和网格划分软件，研究者使用了 **Trelis 15.0**。在模型中实现的主要断层是向北延伸的 **IF**，以及向南延伸的 **SSAF**。在模型中，**SSAF** 和 **IF** 分别延伸 **118 km** 和 **117km**。在主要断层重叠的区域中，有四个交叉断层横跨系统，与主要断层大致正交；每个交叉断层的大致长度为 **11 km**。容纳这种复杂的断层网络的网格由 **8200** 万个六面体单元组成。在容纳断层的体积内和周围，网格密度很高，但是朝向边缘时变得稀疏。

动态结果似乎受四个主要因素控制：①成核位置；②选定的初始应力条件；③断层几何特征；4.选定的锁定深度。许多数值模型的第一阶结果是，各种关于应力水平和断层连通性的不同假设导致贯通的 **SSAF** 和 **IF** 通过 **BSZ** 一步步的破裂而持续破裂，其方式可能与某些古地震证据一致。具有高初始剪切应力的模型有助于贯穿断裂。然而，在较低的初始剪切应力水平下，不同断层段之间的动态的、时间相关的应力相互作用变得更加重要，并且可以确定断裂是否可以在断层系统中传播，以及交叉断层是否变得活跃。

没有交叉断层的连续模型很好地说明了断层分支对破裂传播和滑移的影响。这些实验表明，如果断层构造是连续的，则该区域可能会发生贯穿断裂。这些初始模型的结果很大程度上取决于北部和南部两个分支点的

两个主断层的动态相互作用。在两个主断层最接近的地方，两个结构上的破裂前沿之间可能存在大量的应力影（**stress shadowing**）。这种相互作用超出了简单的静态效应。在某些方面，破裂传播基本上是两个附近分支之间的竞争。在模型中，一个分支在几何上和网格上都更连续，因此往往具有更快的破裂传播，更易于破裂。然而，在一些具有高初始应力的情况下，两个分支上的破裂足够快，足以排除强烈的应力影相互作用，并且破裂可以跨越两个重叠结构进行。研究者注意到两个分支的几何形状略有不同，北边的分支比南边的分支更快地分开。

模型分析表明，初始应力条件下的对比度是控制正应力调制对交叉断层影响的关键。在所有节段的高剪切应力情况下，破裂在主断层段上快速地传播，使得应力切换到挤压，停止破裂之前，几乎没有时间伸展以促进交叉断层上的破裂。然而，在主断层上的剪切应力水平低于交叉断层上的剪切应力水平，主断层上的破裂速度减慢，因此动态伸展有时间建立滑移的临界区域尺寸，即使压力传递变成挤压。

在 **BSZ** 中出现大量的微震活动表明，跨越区域的断层处于临界状态，并且不断地排出它们不能支撑的过度剪切应力。错误定向的主断层被认为是网络的基石断层（**keystone fault**），它们应该通过区域应力积累和微震滑动事件对最佳定向交叉断层的应力传递来达到临界状态。因此，交叉断层之间广泛的滑动趋势和预期的机械相互作用表明，与主断层相比，交叉断层应该具有系统性更高的初始应力，模型证明，交叉断层的参与需要穿过断层。虽然梯形断层假设为多方向破裂引发错误定向的横切断层提供了合理的解释，但它也与通过滑动在最佳定向断层上触发此类事件一致。

模型分析还发现，如果足够大的地震在其中一个地震上成核，那么交叉断层也可以参与贯穿断层。在这种情况下，破裂转移到主断层的相对区段，这些区段在交叉断层上滑移伸展，并且从那里沿着两个主断层向两侧

扩散。然而，重要的是，在一系列较小的滑动事件中，这种应力传递也会在较长时间内累积。因此，监测和了解该地区众多地震群的累积效应非常重要，其中包括高达 M 5.8 的地震。未来，执行更多不同大小和位置的震群型地震模型以更好地表征触发较大事件的可能性，也很重要。

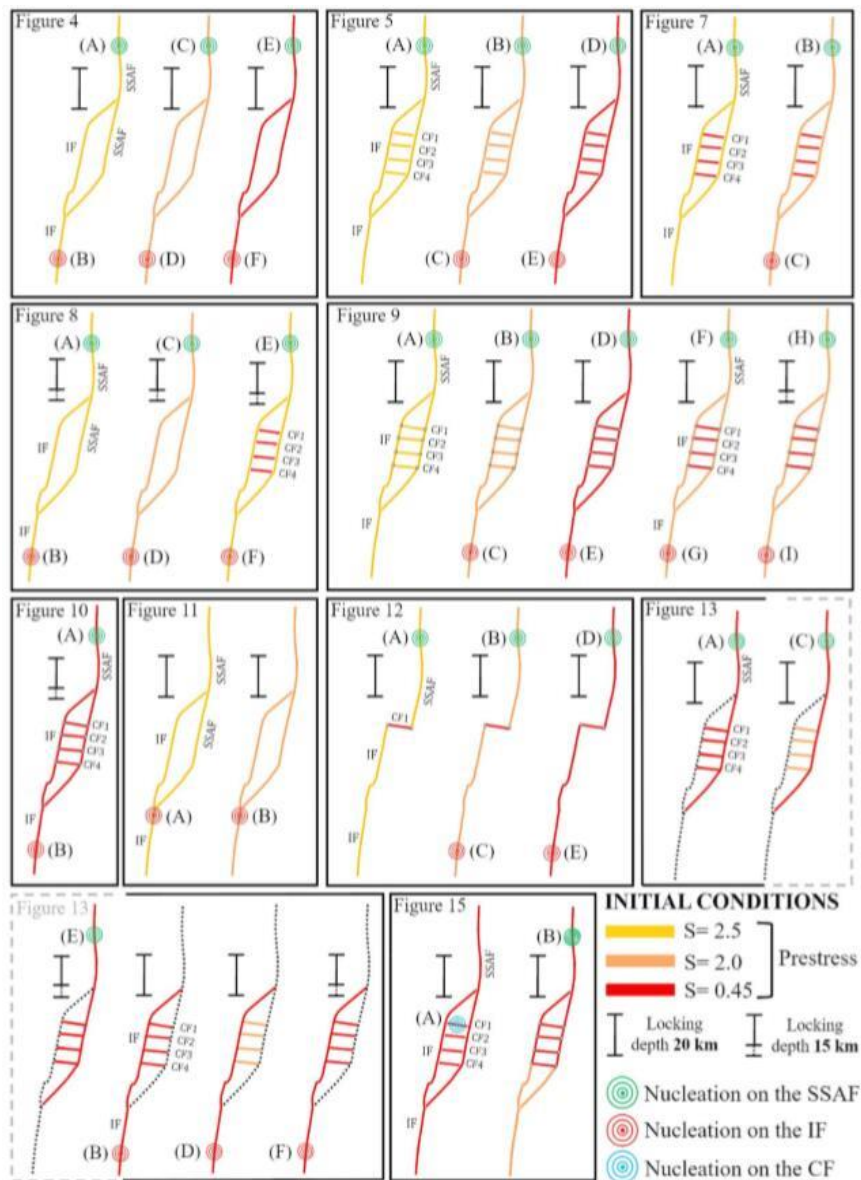


图 2 断层初始几何形态和应力状态

关于该区域中断层几何形状的完全不同的假设包括一个交叉断层的单个步骤。在所有实验中，破裂在连接的交叉断层上传播，但不会跳入相

邻的主断层段。这可能是由于断层之间的垂直性，也可能是由于直角拐角处的小节点间隙所致。未来需要更多的实验来更好地阐明最后一点。

来源: Kyriakopoulos C, Oglesby D D, Rockwell T K, Meltzner A J, Barall M, Fletcher J M. & Tulanowski D. Dynamic rupture scenarios in the Brawley Seismic Zone, Salton Trough, southern California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124:3680–3707, Doi:10.1029/2018JB016795.

主 送：中国地震局领导

联 系：中国地震科学实验场管理部 Email:sycglb@ief.ac.cn