

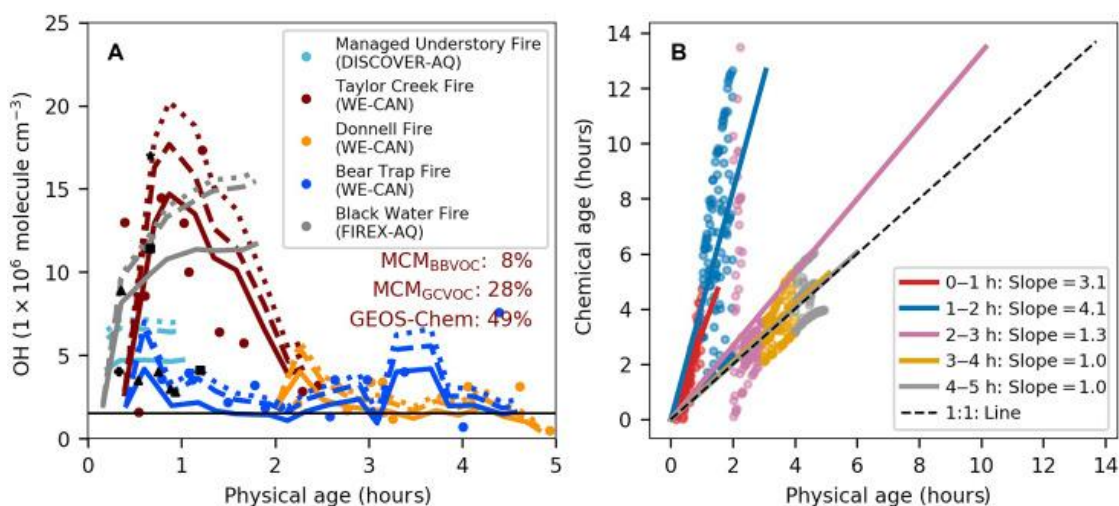
新鲜野火烟雾按下了化学“快进键”

飞机观测揭示新鲜烟羽最初两小时为何反应如此迅速

Jin et al. (2026) | Science Advances

野火烟雾没有时钟，化学反应却有自己的节奏。在我们选取的 5 条白天烟羽中，最初两小时仿佛按下了“快进键”：烟羽每实际传播 1 小时，累积的氧化程度大约相当于典型背景大气中 3–4 小时才能达到的水平。这些观测来自美国 3 次大型飞机观测项目。科研飞机在离火场不同距离的位置反复穿过这些烟羽，留下了排放后前 5 小时烟羽中心的一系列“化学快照”。为了比较 5 条烟羽反应的快慢，我们把“传播了多久”和“经历了多少氧化”分开来看。前者叫物理年龄，后者叫化学年龄。最初两小时，化学年龄远远跑在前面。是什么推动了这段快速反应？烟羽又生成了哪些二次产物？

最初两小时内，烟羽每传播 1 小时，经历的氧化程度约相当于典型背景条件下的 3–4 小时



最初 1–2 小时推算的 OH 浓度最高，此时化学年龄的增长速度也远高于物理年龄。

Jin et al. (2026), Science Advances, Fig. 1, CC BY 4.0.

读图说明：物理年龄由火场距离和飞机实测风速估算。化学年龄则把模式计算的累积 OH 暴露换算成典型背景条件下的等效氧化时间，并不等于烟羽实际传播时间。换算采用的典型 OH 浓度为每立方厘米 150 万个分子。这里的 OH 也不是仪器直接测得，而是通过 VOC 与 CO 化学钟和观测约束模式推算的。

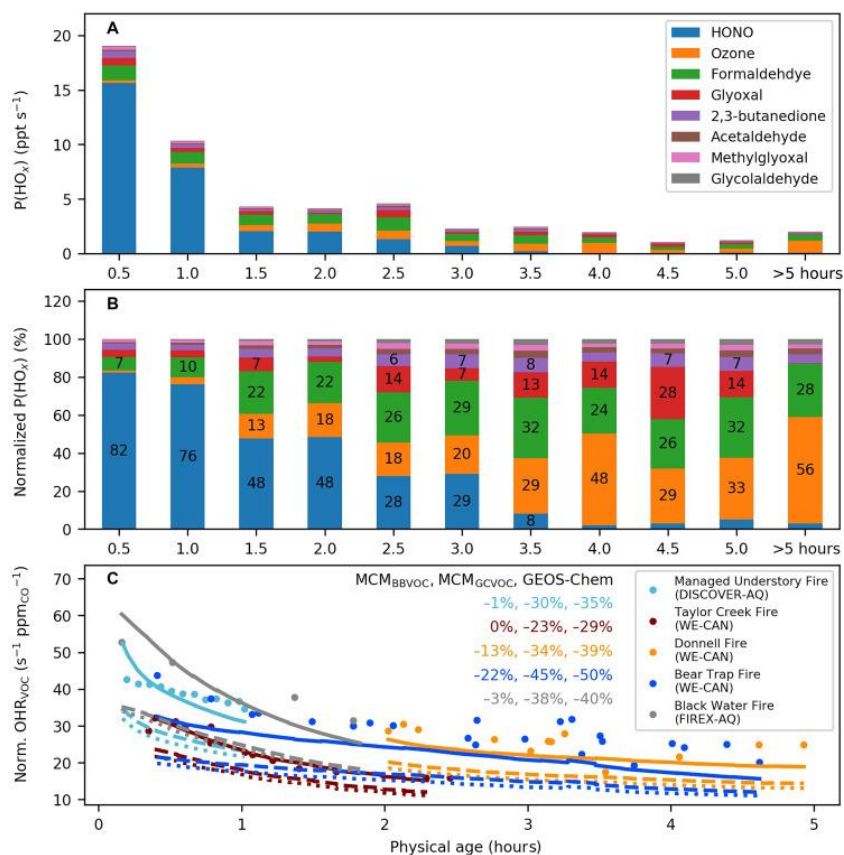
自由基来源也在换班

是什么让烟羽反应得这么快？

烟羽刚离开火场时 HONO 是主力，随后含氧有机气体和臭氧逐渐接棒。

OH 常被称为大气中的“清洁工”，但它不只是消耗污染物，还会启动一连串反应，重新塑造烟羽的化学组成。我们发现，在排放后的第 1 小时，HONO 光解是自由基的主要来源。在估算的自由基生成量中，HONO 平均贡献约四分之三；不过，其中一条 HONO 特别丰富的烟羽明显拉高了这个平均值。

HONO 消耗得很快。到了第 2–5 小时，含氧有机气体的光解接过了主力，贡献了估算自由基生成量的约 40%–60%；烟羽越老、越稀，臭氧光解也越重要。自由基来源的更替有助于解释 OH 为何迅速变化：根据观测约束模式推算，OH 在最初 1–2 小时达到每立方厘米 500 万–2000 万个分子，约 3–5 小时后逐渐回落到典型背景水平。



最初 HONO 是主力；随着烟羽老化，含氧有机气体和臭氧逐渐接棒。

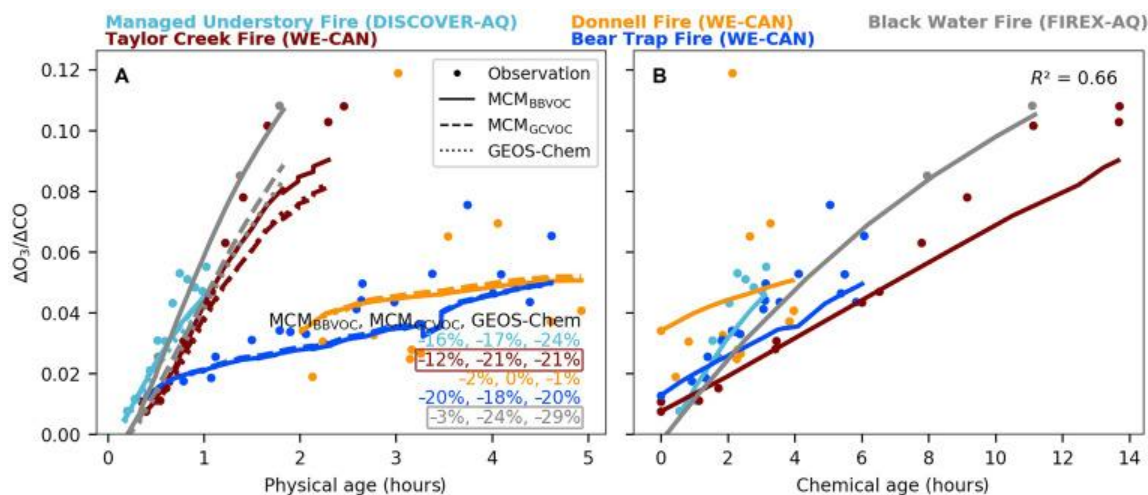
Jin et al. (2026), Fig. 2, CC BY 4.0.

短时间内如此高的 OH，不只会消耗 VOCs，也会启动快速生成臭氧的反应链。

化学年龄解释了烟羽之间的差别

为什么不同烟羽生成臭氧的速度差别这么大？

换用化学年龄后，原本分散的臭氧变化呈现出更清楚的规律。



与传播时间相比，化学年龄让不同烟羽中的臭氧变化呈现出更清楚的规律。

Jin et al. (2026), Fig. 3, CC BY 4.0.

在排放后的前 5 小时，5 条烟羽都在快速生成臭氧，但生成速率仍相差约 4 倍。只看烟羽传播了多久，很难解释这种差异。

原因在于，即使同样传播 1 小时，不同烟羽经历的 OH 暴露也可能相差很多。化学年龄把这部分差异考虑进来，相当于用同一把“氧化尺”衡量每条烟羽。换用这把尺子后，臭氧增强与烟羽演化的关系更清楚， $R^2 = 0.66$ 。对于 VOC 氧化以及臭氧和 PAN 生成，化学年龄可以解释 5 条烟羽之间约 40%–70% 的差异，并把烟羽之间的速率差异从约 4 倍缩小到约 2 倍。

化学年龄告诉我们反应进行到了哪一步，却不能单独判断臭氧生成更受 VOCs 还是 NO_x 控制。

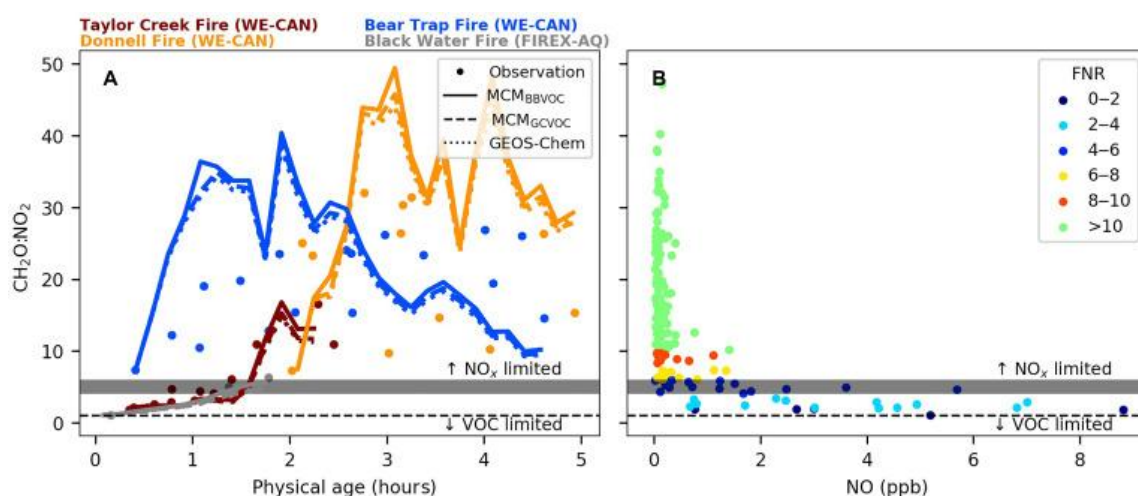
臭氧控制条件也在变化

新鲜烟羽可能从 VOC 受限转向 NO_x受限

在 5 条烟羽中，至少 2 条在最初两小时内从 VOC 受限或过渡状态转向 NO_x受限。

臭氧来自 VOCs 和 NO_x在阳光下的一系列反应。哪一类前体物对臭氧生成影响更大，取决于烟羽中 VOCs 和 NO_x的相对水平。我们发现，5 条烟羽中至少有 2 条起初处于 VOC 受限或过渡状态；随着烟羽老化，它们在前 2 小时内逐渐转向 NO_x受限，这与 NO_x快速损耗的现象一致。

如果直接套用城市空气污染中常用的指标，这个早期转变很容易被忽略。FNR 是甲醛与二氧化氮的比值，常被用来判断臭氧敏感性；城市研究中常见的参考阈值约为 1。如果用 1 来判断，这 5 条烟羽从一开始都会被归为 NO_x受限，前期的 VOC 受限或过渡阶段也就看不到了。针对这 5 个案例，3 种统计方法给出的过渡范围约为 4–6，另外 2 项化学指标也指向同样的转变。



至少 2 条烟羽随着老化从 VOC 受限或过渡状态转向 NO_x受限。

Jin et al. (2026), Fig. 4, CC BY 4.0.

适用范围：FNR 4–6 是根据这 5 条精选烟羽得到的近似过渡范围，不能直接推广为所有生物质燃烧烟雾的通用阈值。

臭氧控制条件变化得如此迅速，也带来一个实际问题：简化化学机制能跟得上吗？

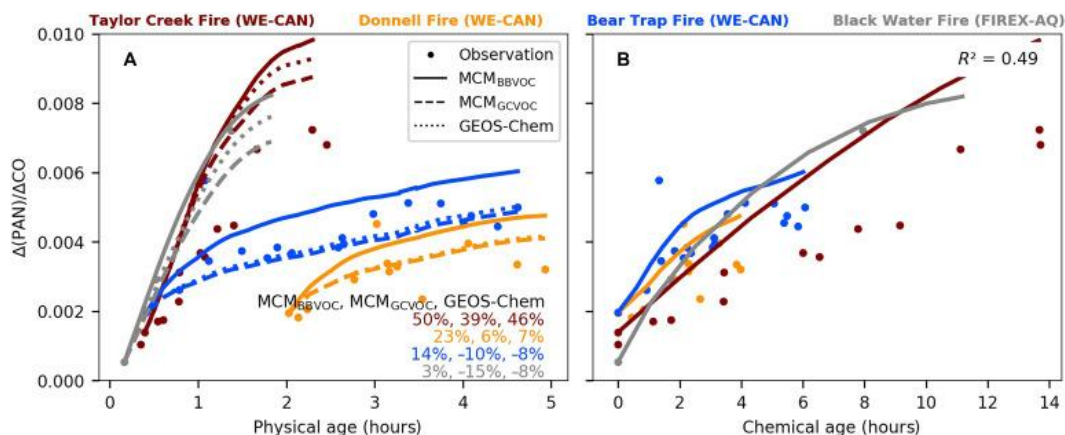
检验模式

模式能跟上快速变化的烟羽化学吗？

模式能否算对 OH、臭氧和有机硝酸盐，很大程度上取决于它有没有把烟雾中的 VOCs 考虑完整。

我们先采用信息最完整的一套设置：输入实测 HONO，用观测约束光解条件，并纳入约 90 类主要来自飞机观测的烟雾 VOC 信号。采用详细化学机制 MCM 后，自由基收支和几个关键产物的模拟与观测差距通常在约 20% 以内；不过，部分烟羽的 OH 偏差仍可达到约 40%。在这些观测约束下，模式较好地再现了采样烟羽中心推算的 OH 和观测到的臭氧变化。在这一分析范围内，我们没有发现现有气相化学存在重大缺口的证据。

换成更短的 VOC 清单后，模式表现明显变差：模式算出的 OH 最高可偏高约 50%，2 条 VOC 受限烟羽中的臭氧低估 20%–30%，3 条 WE-CAN 烟羽中的有机硝酸盐低估约 50%。在被模式漏掉的 VOC–OH 反应活性中，丙烯醛、1,3-丁二烯和呋喃类合计约占四分之三；双乙酰和儿茶酚也会影响臭氧或有机硝酸盐化学。即使采用详细机制，4 条烟羽中仍有 1 条的 PAN 被高估约 50%–60%。PAN 可以把活性氮输送到下风向，这一偏差提示某些 NO_x 损耗过程仍未被充分表示。



在 4 条有 PAN 观测的烟羽中，化学年龄解释了约一半的 PAN 生成差异；即使采用详细机制，仍有 1 条烟羽的 PAN 被明显高估。

图示：Jin et al. (2026), Fig. 6；模式比较数值还来自 Figs. 1、3 和 S6。CC BY 4.0。

要更好地再现 OH、臭氧和有机硝酸盐，精简机制仍需更完整地表示野火烟雾中的 VOCs。

查看论文与开放资源：[Science Advances 原文](#) · [补充材料](#) · [NASA 航测数据](#) · [FOAM 箱式模型](#)

这项分析选取了美国 3 次飞机观测项目中的 5 条白天烟羽，主要关注排放后前 5 小时的烟羽中心。物理年龄由火场距离和风速估算，OH 由 VOC 化学钟和观测约束模式推算，二者都不是直接测量值。化学年龄再由模式计算的 OH 暴露换算，因此不等于烟羽实际传播时间。

部分未标定的 VOC 和有机硝酸盐信号存在较大不确定性。这里看到的是 5 个精选案例，不代表全美野火烟羽的平均状况。