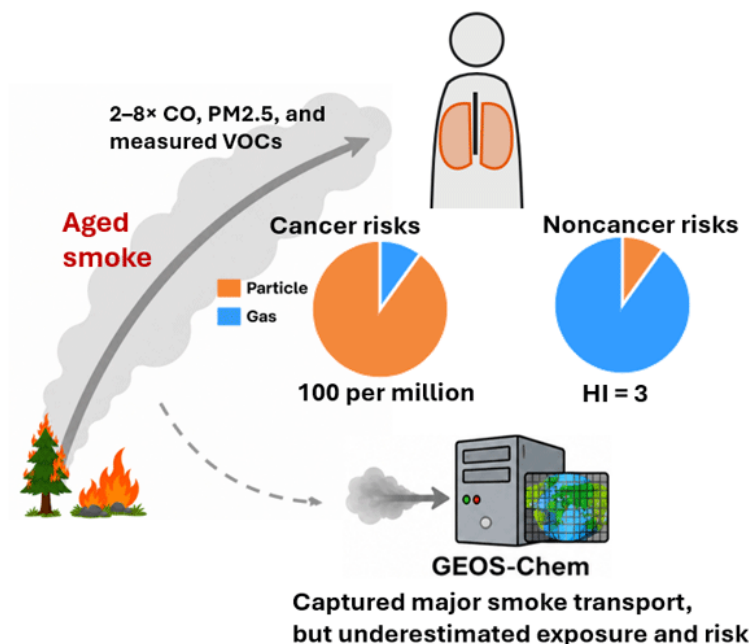


烟越浓，臭氧不一定越高

一团老化野火烟雾抵达城市后发生了什么？

Jin et al. (2026) | Atmospheric Chemistry and Physics



论文要点图：老化野火烟雾显著增加颗粒物、一氧化碳和有机气体暴露；颗粒物与气态有害污染物分别主导不同类型的健康风险；GEOS-Chem捕捉到主要输送，却低估了暴露和风险。

来源：Jin et al. (2026)，论文要点图，CC BY 4.0。

1分钟读懂这项研究

漂了几天的烟：来自加利福尼亚州和太平洋西北地区的烟雾经过至少3天输送后抵达蒙大拿州米苏拉。

污染明显增强：烟雾使一氧化碳、PM2.5和测得的挥发性有机物升高约2-8倍，小时PM2.5最高达到120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

臭氧并非一路升高：轻烟下臭氧增加；当PM2.5超过约30-40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 后，臭氧趋于平缓甚至下降。

颗粒物不是全部：颗粒物主导癌症风险，而丙烯醛、甲醛等气态污染物主导慢性非癌症风险。

01 | 从火场到城市

一场远方的野火，如何变成本地空气污染？

野火烟雾可以随风跨越数百甚至上千公里。2020年9月，美国西部大范围火灾产生的烟羽向内陆输送，并在米苏拉形成三次持续多日的地面烟雾事件。到达城市时，许多烟团已经在大气中旅行和反应了至少3天。

卫星看到城市上空有烟，并不代表烟已经来到人们呼吸的高度；只看PM_{2.5}，也可能漏掉被降雨优先清除颗粒物后的残余气态烟雾。因此，研究团队把卫星、PM_{2.5}、一氧化碳以及乙腈、呋喃和马来酸酐等化学示踪物放在一起，判断烟雾是否真正影响地面。

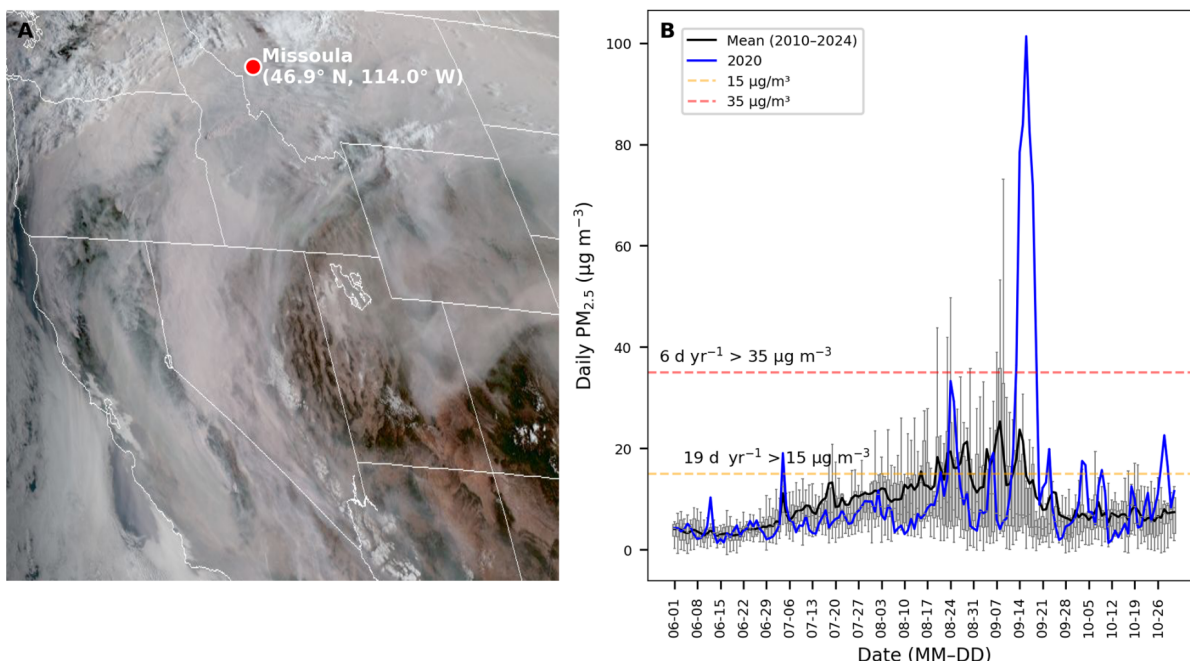


图1. 2020年9月15日美国西部的卫星烟雾图，以及米苏拉2020年火季日均PM_{2.5}相对于2010-2024年气候分布的变化。

来源：Jin et al. (2026), Fig. 1, CC BY 4.0。

关键结论：判断公众是否真的暴露于烟雾，不能只依赖一张卫星图或一个颗粒物指标。

02 | 烟雾的化学改造

烟还在，但已经不是离开火场时的那团烟了

老化并不等于消失。与城市背景相比，烟雾期平均PM_{2.5}升至约6.7倍，一氧化碳升至2.5倍，测得的75种挥发性有机物总量升至2.3倍；氮氧化物却几乎没有增加。烟雾抵达远方城市时，并不是简单的“所有污染物一起变多”。

烟羽更像一个边走边反应的化学反应器。一些从火场直接排出的活性气体在途中被消耗；甲醛、乙醛等含氧有机物又可以在输送过程中继续生成。75种有机气体中，有15种被美国EPA列为有害空气污染物，它们约占测得有机气体的一半。仅测PM_{2.5}无法完整描述人们最终呼吸到的混合物。

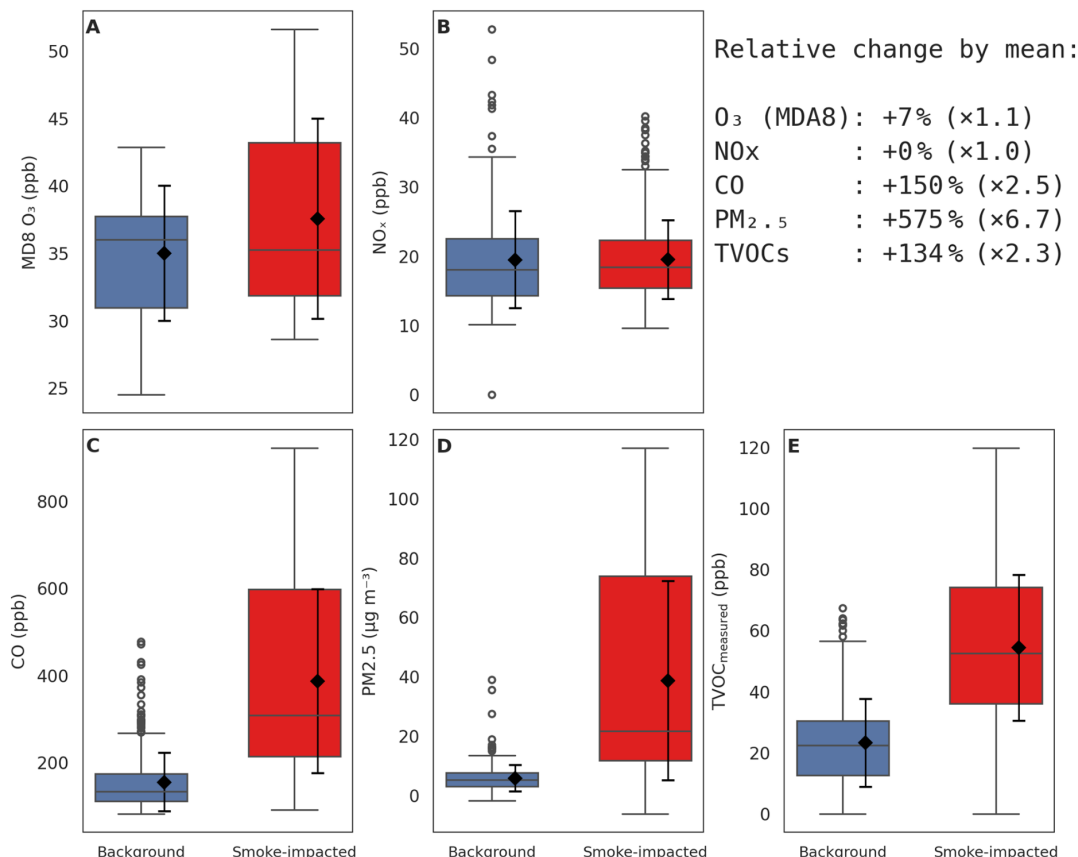


图2. 烟雾期与背景期污染物对比。PM_{2.5}、一氧化碳和测得的有机气体明显升高；氮氧化物几乎不变，臭氧平均只小幅增加。

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

一个好比喻：老化烟雾不是被动移动的灰尘，而是一座随风移动的小型化学反应器。

03 | 一个反直觉结果

烟越浓，臭氧为什么不一定越高？

臭氧并不是由火灾直接排放的，而是由有机气体和氮氧化物在阳光下反应生成。直觉上，烟越多似乎应该带来更多臭氧；但观测并不是一条简单的上升直线。

轻度烟雾下，每日最大8小时平均臭氧会随PM_{2.5}升高；当PM_{2.5}超过约30-40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 后，臭氧趋于平缓甚至下降。最强烟雾期间，地面臭氧最多下降约15 ppb，同时到达地面的短波辐射减少约50%。更弱的阳光、没有同步增加的氮氧化物以及边界层变化，可能共同限制了臭氧生成。

GEOS-Chem和区域预报系统AIRPACT却都让臭氧随着烟雾持续增加，错过了这个转折。这意味着模式即使预测到了烟，也未必算对了烟雾中的光化学过程。

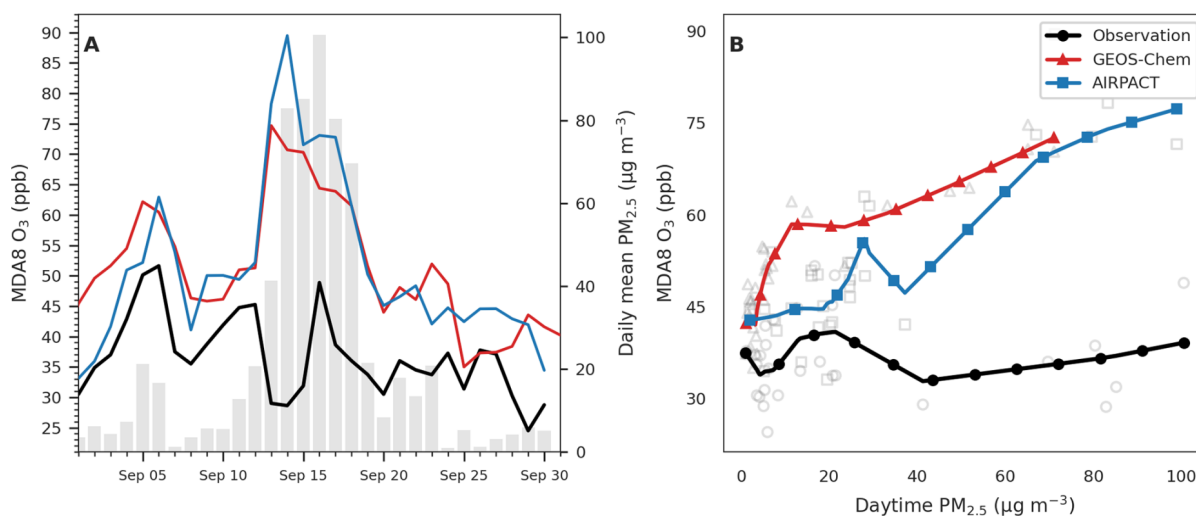


图3. 观测中，臭氧在轻烟下增加，却在重烟下趋平或下降；GEOS-Chem和AIRPACT继续预测臭氧上升。

来源：Jin et al. (2026), Fig. 6, CC BY 4.0。

关键结论：最浓的烟不一定对应最高的臭氧。预测重烟条件下的臭氧，需要同时算对辐射、氮氧化物和烟雾化学。

04 | 颗粒物之外的风险

健康风险来自两类污染物，模型却低估了其中一类

研究设置了一个筛查级上限情景：假设米苏拉2020年经历的火季在70年生命周期中每年重复。它用于比较不同污染物的长期贡献，不是对一次烟雾事件造成多少实际病例的统计，也不是个人诊断。

在这一情景下，烟雾归因的额外终生癌症风险约为每百万人100例，其中约90%来自PM_{2.5}。慢性非癌症危害指数HI约为3，约90%来自气态有害空气污染物，尤其是丙烯醛和甲醛。HI高于1表示需要进一步关注；HI=3并不等于一定患病，也不表示患病概率增加3倍。

GEOS-Chem抓住了主要烟雾到达时间，却低估多种污染物约30%-90%。相应地，模型给出的癌症风险约为每百万人63例，低估约40%；慢性HI只有约0.3，是观测约束结果的十分之一。

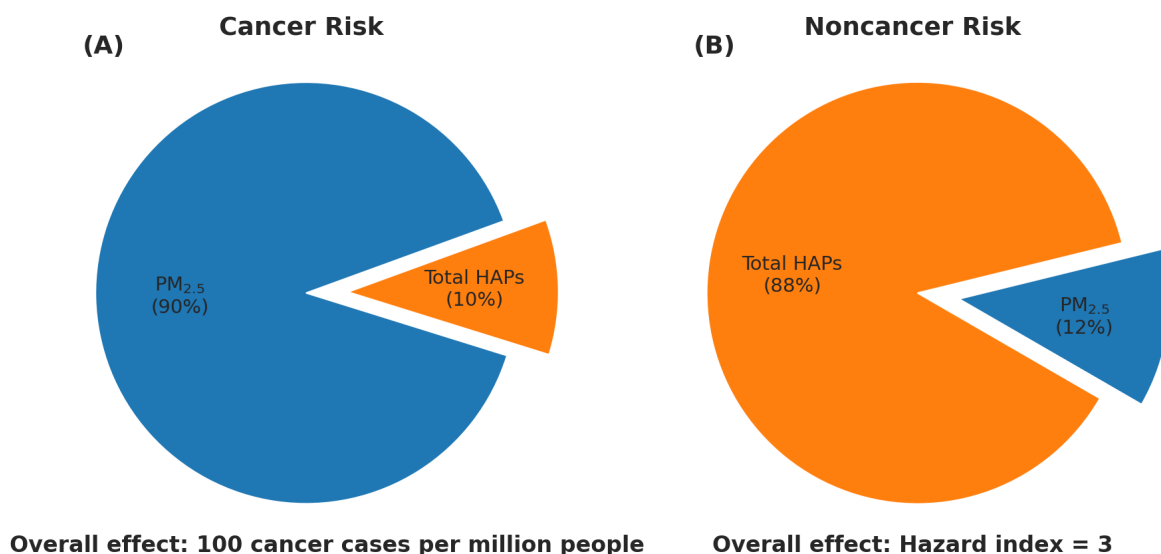


图4. PM_{2.5}主导筛查情景下的癌症风险，气态有害空气污染物则主导慢性非癌症危害指数。

来源：Jin et al. (2026), Fig. 7, CC BY 4.0。

如何读这些数字：颗粒物过滤很重要，但它不能去除所有有害气体。烟雾监测、模式和室内防护都需要同时考虑颗粒物与气态污染物。

为什么这项研究值得关注？

我们需要预测的不只是“烟在哪里”，还包括“人们吸进了什么”

这项研究把火场排放、数日输送后的化学变化、城市地面暴露、健康风险和模式评估连在了同一条证据链上。它提醒我们：一团跨州而来的老化烟雾，不能只用可见烟霾或PM2.5来代表。

要让空气质量预报真正服务公众，模型不仅要知道火灾排放了多少，还要更完整地表示挥发性有机物、含氧产物的二次生成、烟雾对阳光的削弱以及高毒性气态污染物。只有这样，预报才能从判断烟会不会来，进一步回答烟到达时包含什么、风险有多大。

这是一项针对特定城市和特定野火季的案例研究，结果不应直接外推到所有地区。但它提供了少见的逐小时、化学组分清晰的地面证据，让我们更接近回答一个现实问题：当一团漂流数日的烟最终来到城市上空时，人们究竟在呼吸什么？

模式表现: GEOS-Chem能够捕捉主要烟雾入侵，却低估CO、PM2.5和有机气体30%-90%。单纯把火灾排放统一放大3倍，也无法同时校正气体和颗粒物。

论文与开放资源

论文: [Jin et al. \(2026\), Atmospheric Chemistry and Physics](#)

数据: [Zenodo](#)

分析代码: [GitHub](#)

代码存档: [Zenodo](#)

说明: 本文依据正式发表论文整理。图件与论文采用CC BY 4.0许可。定量结果和方法细节以ACP原文及补充材料为准。