
超细颗粒物伤身，评估风险不能只看“量”，更要看“质”和“大小”

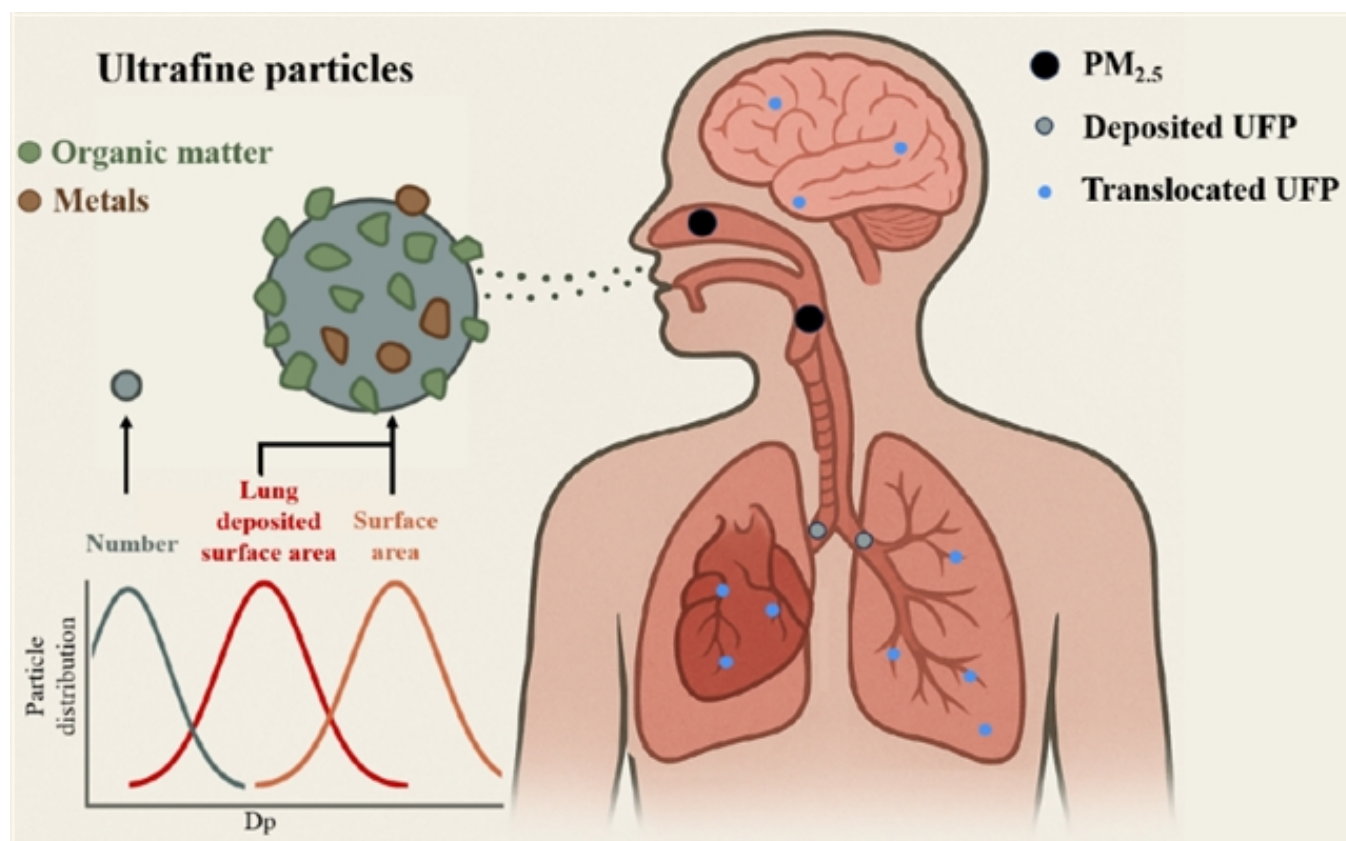
作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41668.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

超细颗粒物伤身，评估风险不能只看“量”，更要看“质”和“大小”。大气超细颗粒物（UFP）虽在细颗粒物（PM_{2.5}）质量负荷中占比极小，却在大气颗粒物数浓度和表面积浓度中占据主导。同时，UFP因其独特的理化特性具有不容忽视的健康风险：其粒径极小、易于深入肺泡；相对大的比表面积使其更易吸附有毒物质；同时，其在城市地区的主要一次排放源中有毒组分占比也更高。然而，当前全球空气质量标准仍以颗粒物质量浓度为核心管控指标，UFP暂无独立的监管限值，其暴露评估指标也远未统一。

近日，清华大学环境学院贺克斌院士、蒋靖坤教授、郑光洁副教授团队联合美国田纳西大学邢佳等团队，合作在ENGINEERING Environment期刊上发表题为Ultrafine particles and health: aligning size distributions and chemical composition for more comprehensive risk assessment的观点文章。该文章系统整合了流行病学与毒理学证据，呼吁将超细颗粒物风险评估范式从数浓度中心化转向粒径-表面积-组分协同解析的新模式，为UFP的标准制定与精准防控提供了前沿视角。



度量困境：当颗粒数浓度遇上表面积浓度

究竟采用何种指标来准确量化暴露水平，是当前UFP研究面临的首要挑战。目前，学界最常采用的颗粒数浓度（PNC）对局地排放具有高度敏感性，且不同研究关注的粒径范围存在显著差异（如10—30nm、20—100nm、10nm以上等）。这种度量标准的不一致性，导致现有流行病学研究结果存在明显异质性：部分研究表明UFP暴露与心血管死亡率增加相关，而另一些同类研究则未发现显著关联。更为关键的是，即便基于同一数据集，当暴露评估指标由PNC转换为颗粒物表面积浓度（PSC）时，原本统计学不显著的死亡风险关联亦可能呈现出显著正相关。

此外，UFP在大气环境中常与PM_{2.5}、二氧化氮（NO₂）等常规污染物共存，传统的单污染物统计模型难以有效剥离出UFP的独立健康效应。尽管世界卫生组织（WHO）在2021年发布的《全球空气质量指南》中建议采用PNC量化和监测UFP，但也明确指出当前尚无法确定其健康阈值。这也指明了UFP风险管理框架的完善方向：以粒径分布、表面积剂量与化学组分的协同表征为基础，推动暴露评估指标统一，为制定针对性的管控标准奠定科学基础。

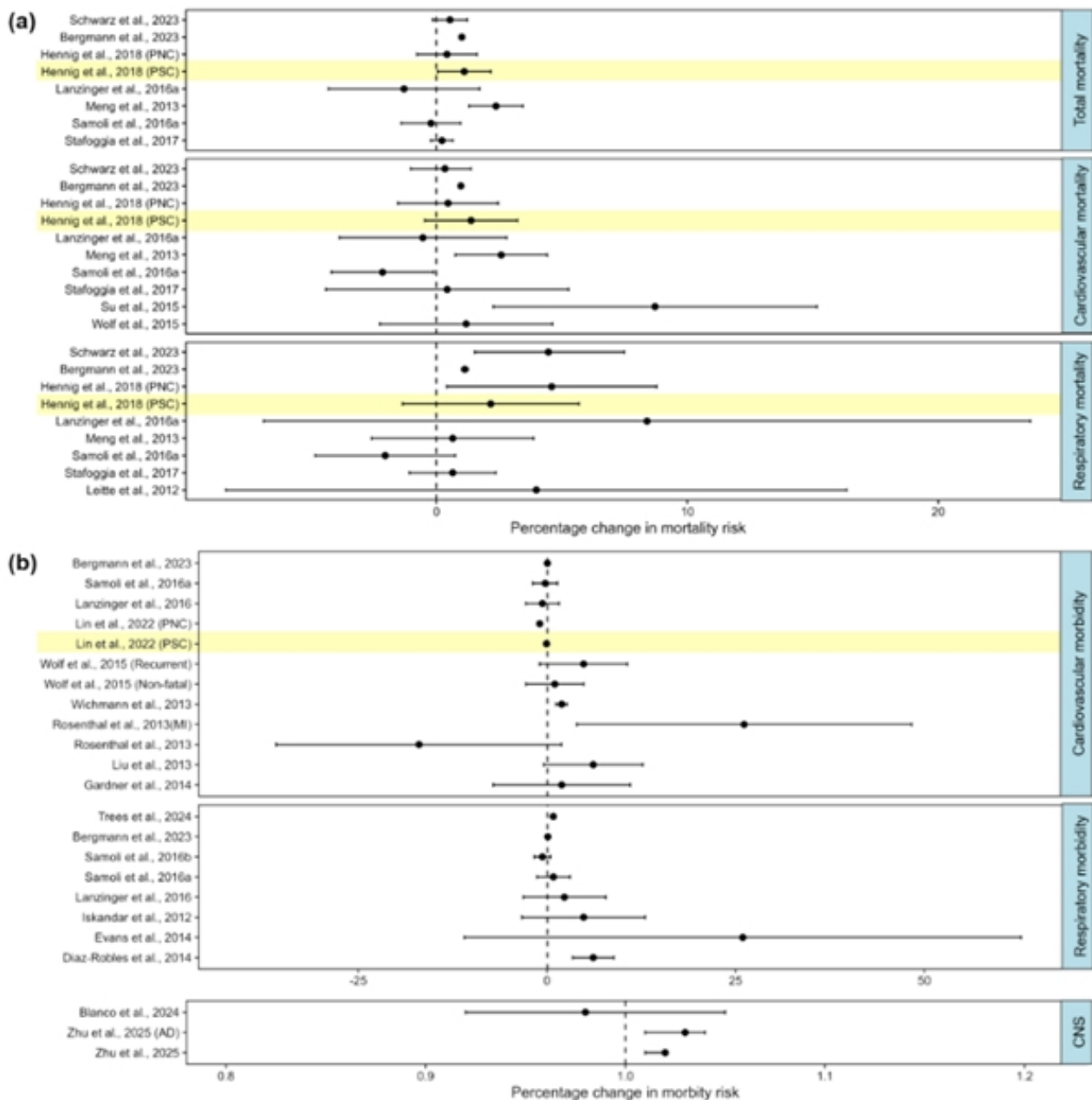


图1.与UFP浓度四分位距增量相关的短期健康风险变化。(a) 全因、心血管、呼吸系统死亡风险百分比变化；(b) 住院、急诊就诊及中枢神经系统疾病所指示的发病率风险百分比变化。MI：心肌梗死；AD：阿尔茨海默病；CNS：中枢神经系统。图中高亮的研究采用了PSC指标，其余结果则采用PNC作为UFP暴露量化指标。该图在Ohlwein et al., IJPH, 2019文章图1、图2基础上更新 (DOI:10.1007/s00038-019-01202-7)。

从计数颗粒到定量沉积表面：毒理学为剂量指标【提供新视角】

突破口源于毒理学领域的生物有效剂量概念。研究发现，UFP毒性由粒径、沉积表面积和化学组成共同影响，因此PNC可能无法单独反映其毒性。颗粒的比表面积越大，其表面吸附的过渡金属（如Fe、Cu）与有机碳负荷越高；进入肺泡后，其诱导活性氧（ROS）生成的能力也越强，进而引发氧化应激、炎症反应乃至DNA损伤。更为关键的是，UFP可穿透气血屏障，经血液循环或嗅

神经途径易位至心脏和大脑。动物实验已证实，UFP暴露可促进血栓形成并诱发神经炎症。基于上述机制，肺部沉积表面积（LDSA）作为综合考量粒径分布、沉积效率与表面积指标，在流行病学研究中展现出比PNC更稳定、统计学更显著的健康损伤关联。这为将表面积相关指标纳入UFP风险评估体系提供了坚实的毒理学机制支撑。

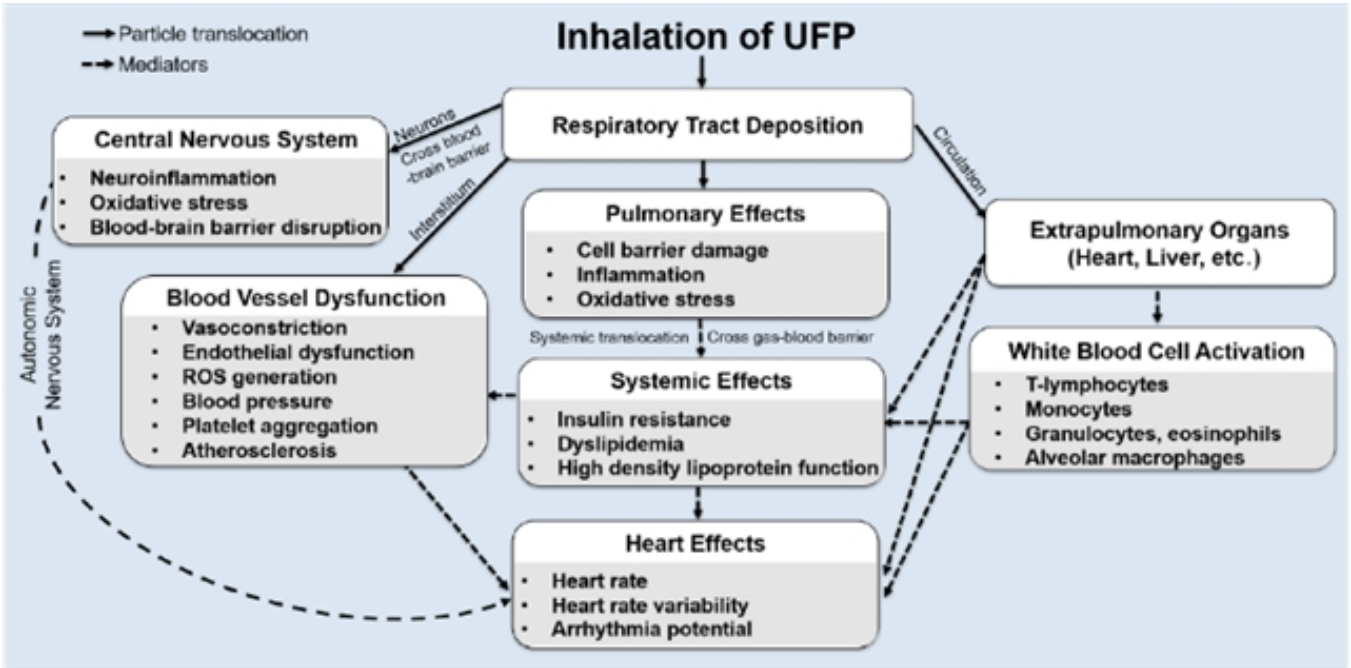


图2.吸入UFP后的效应与靶器官。该图改自Oberdöster et al., EHP, 2005文章（DOI: 10.1289/ehp.7339）。

构建分级监测框架，弥合风险评估与污染治理的鸿沟

基于上述证据，研究提出了一套分层级且具可操作性的理化监测框架。文章建议将颗粒粒径分布与黑碳/元素碳列为第一层级，纳入常规监测网络；将过渡金属溶解度、颗粒表面电荷等理化特征列为第二层级，用于专项观测；将混合状态、吸湿性等复杂属性列为第三层级，用于深度机理研究。这一层级策略兼顾了科学迫切性与技术可行性，有效避免了盲目追求全要素监测造成的资源浪费。同时，研究强调了高分辨率时空暴露模型和类器官芯片等体外模型的应用。这些前沿技术的引入，将推动未来风险评估从流行病学关联迈向毒理机制验证。

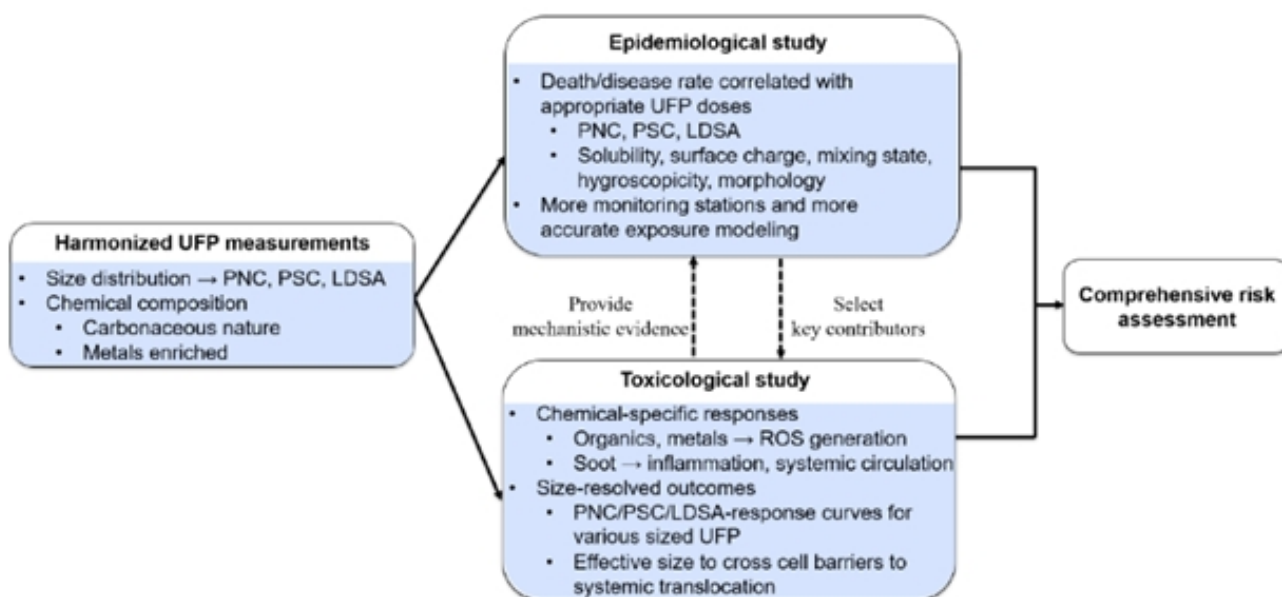


图3.超细颗粒物风险评估框架。

编者按

这篇观点文章围绕UFP的监测与评估，提出了粒径+表面积+组分三位一体评估体系，为下一阶段环境空气质量标准修订、超低排放技术评估及新污染物协同治理提供了科学依据。尤其在新能源汽车普及却难以消除刹车与轮胎磨损UFP排放的背景下，该框架可为交通源、工业源及城市热点的精细化管控提供重要参考。当然，从技术方案到监管实践仍有大量工作待完成，该文有助于为后续政策制定和国际经验互相借鉴提供一个扎实的起点。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：<https://journal.hep.com.cn/fese/EN/10.1007/s11783-026-2179-8>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：贺克斌等 来源：《工程·环境》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发