新粒子生长：连接大气微观化学与宏观气候环境效应的核心枢纽

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/42813.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！

新粒子生长：连接大气微观化学与宏观气候环境效应的核心枢纽。
大气中相当一部分气溶胶并非直接排放，而是由气态前体物经成核形成1-2 nm分子团簇后，再通过新粒子生长（NPG）过程逐步长大。能否成功跨越这一关键阶段，直接决定了这些微观粒子是消亡于无形，还是成长为影响云层辐射特性、乃至诱发重污染天气的极少数幸存粒子。因此，解码粒子生长机制，正是连接大气微观化学过程与宏观气候、环境效应的核心枢纽。

北京大学吴志军、胡敏团队与德国莱布尼茨对流层研究所Alfred Wiedensohler团队合作在中国工程院Engineering集群分刊ENGINEERING Environment发表题为The current understanding of atmospheric new particle growth的综述论文，系统揭示了大气新粒子由碰并、凝结和非均相反应协同驱动的增长机制，明确了氧化有机分子（OOMs）凝结是城市近地面粒子增长的主导路径，并指出突破纳米颗粒化学组成测量技术瓶颈、提升有机物气固分配与非均相生成等过程机制认识、精细化效应评估是该领域研究的关键突破口。

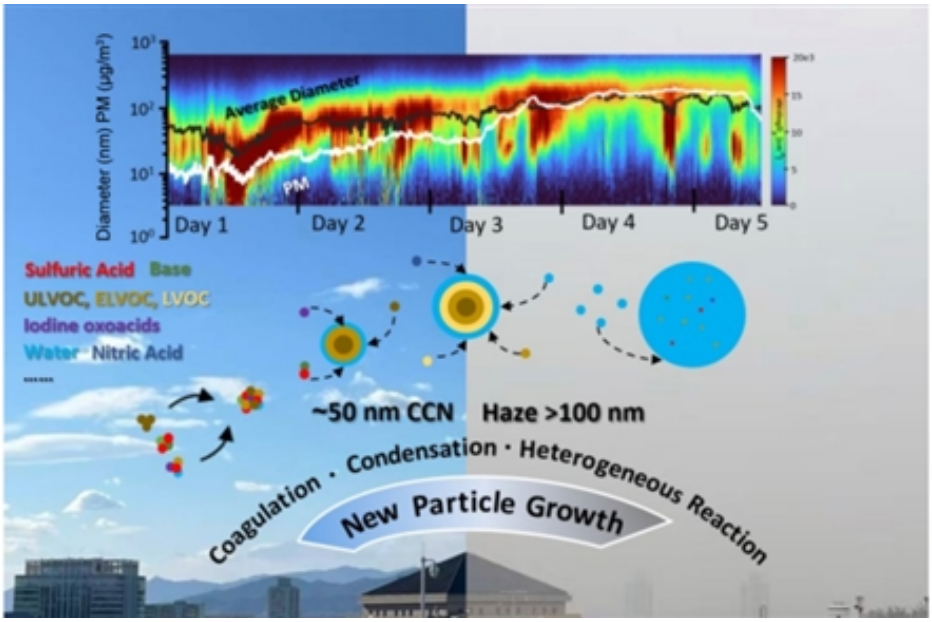


图1.展示NPG的关键机制及其环境影响。粒子数粒径分布（PNSD）图源自2023年秋季北京大学超级观测站的实测数据。

纳米颗粒物增长的多维度表征方法

当前，解析新粒子生长（NPG）过程主要依赖于多维度的物理与化学表征技术。在物理测量方面，扫描电迁移率颗粒物粒径谱仪（SMPS）等仪器被广泛用于捕获连续的颗粒物粒径分布（PNSD）数据。在化学表征方面，由于超细颗粒物质量极小，科学家常借助挥发性与吸湿性串联差分电迁移率分析仪（VH-TDMA）和有效密度测量，来间接推断新粒子的化学组分。此外，高分辨率化学电离质谱（如CI-API-TOF-MS）和热吸附解析软电离质谱（TD-CIMS）等前沿设备，实现了对气态前体物（如极低挥发性有机物、硫酸等）以及纳米颗粒物化学组成的直接在线定量解析。基于上述表征方法，全球不同大气环境下的综合测量结果显示，小于25 nm颗粒物的GR通常在1-10 nm/h 之间。由于受到强烈人为排放的直接影响，城市和乡村地区的GR普遍较高，部分高污染环境下甚至超过 10 nm/h。森林地区因生物源VOCs氧化的显著贡献，其GR与城市环境相近；而偏远的山区和海洋大气环境中，由于气态前体物浓度普遍较低，新粒子的生长速率通常更为缓慢。

多因素驱动的增长机制

新粒子的生长并非单一物理过程，而是由凝并、冷凝和非均相化学反应协同驱动的复杂动力学体系。

凝并生长（Coagulation）：模态内及模态间的新生颗粒物与背景气溶胶相互碰撞、结合。虽然这并非单个纳米粒子快速长大的主要化学驱动力，但会对数据观测中呈现的表观生长速率产生不可忽视的贡献。

冷凝生长（Condensation）：这是主导新粒子生长的最核心机制。对于3 nm以下的初始小团簇，硫酸、碘氧酸、硝酸等低挥发性无机酸与氨或胺的冷凝起着至关重要的作用。而当粒径跨越3 nm这一阈值后，氧化有机分子（OOMs）的冷凝开始占据绝对主导地位。这些OOMs主要通过挥发性有机物（VOCs）的快速自氧化或多代氧化过程生成。

非均相化学反应（Heterogeneous Reactions）：随着粒子逐渐长大（>25 nm）且含水量逐渐增加，气态物质在被摄入颗粒相后，还会在液相环境中发生质子化、低聚化等非均相化学反应。这一过程会生成更多低挥发性物质，进一步促进颗粒物的质量与体积爆发式增长。

三重瓶颈制约认知深化

当前NPG研究领域存在三重核心挑战。一是观测技术存在显著盲区：50 nm以下纳米粒子的原位化学表征、低挥发性有机化合物（VOC）的高精度质谱依赖设备，现有质谱难以区分同分异构体、极低挥发性前体物定量误差大，室外烟雾箱全流程模拟成套装置研发不足；二是机理认知盲区：现有模型普遍低估15 nm以上粒子的生长速率，多组分有机物及液相非均相反应参数缺失，污染城市高NO?环境下氧化有机分子的生成路径未完全厘清；三是效应评估不确定性缺失：基于观测的NPG对云凝结核（CCN）贡献的估算受到气团变化、排放影响，而新粒子增长后颗粒物的健康效应缺乏系统的毒理学与流行病学研究。

表1.不同大气环境下测得的颗粒生长速率

Type	Location	Season	*GR* (nm/h)]	Size (nm)	Reference
Urban	Shanghai, China	Winter	6.5	3–7	Yao et al., 2018
	Beijing, China	Fall	3.2	3–7	Tang et al., 2025
	Nanjing, China	Fall	6.5	3–10	Dai et al., 2017
Rural	Melpitz, Germany	All	5.7	3–7	Manninen et al., 2010
	Järvselja, Estonia	All	3.95	3–7	Vana et al., 2016
Forest	Hyytiälä, Finland	Spring	2.8	3–7	Kulmala et al., 2013
Coastal	Po Valley, Italy	Summer	6	3–7	Kontkanen et al., 2016
	Agia Marina, Cyprus	All	9.2	3–7	Baalbaki et al., 2021
Mountain	Jungfraujoch, Switzerland	All	7.2	3–7	Manninen et al., 2010
	Pallas, Finland	All	5.6	3–7	Manninen et al., 2010
	Chacaltaya, Bolivia	All	6.9	3–7	Rose et al., 2015

表2.不同观测站点中新生成颗粒的水溶性组分

Location	Environment/ Time	Particle size (nm)	Volume fraction of water soluble component	References
Gucheng, North China Plain	Rural site	20253040	0.410.220.130.11	Hong et al., 2024
Wangdu, North China Plain	Rural site	3050	0.64±0.060.61±0.06	Wu et al., 2017a
Beijing, North China Plain	Urban site	50	0.42	Wu et al., 2016
Atlanta	Urban site	10	0.83	Sakurai et al., 2005
Sapporo, northern, Japan	Urban site surrounded by deciduous forest	20	0.25	Jung and Kawamura, 2014
Melpitz, Germany	Rural site	3050	0.30.2	Wu et al., 2015
Thuringer Wald mid-level "in central Germany	Mountain site	30–45	0.59±0.03	Wu et al., 2013
Hyytiälä, Southern Finland	Forest site	10203050	0.550.460.300.16	Ehn et al., 2007
Mace Head	Coastal area	8–10	0–0.16	Väkevä et al., 2002

面对上述瓶颈，未来的NPG研究需要在以下几个维度寻求科学突破：

观测技术革新：需进一步开发针对50
nm以下颗粒物理化特性的先进测量技术，并探索更高效的10 nm以下粒子荷电方法，以降低前端测量的系统性误差。同时，在质谱技术中引入离子迁移率分离等维度，打破同分异构体无法区分的困局，建立覆盖全挥发性区间的超高分辨率在线测量体系。

补齐机理认知短板：需要突破传统的单组分VOC氧化框架，重点探究半挥发性和中等挥发性有机物（SVOCs和IVOCs）以及人为源物种（如萘）的多代氧化与自氧化机制。此外，可借助机器学习等前沿手段优化OOMs挥发性的参数化方案，并在实验室中深入验证相对湿度、pH值等变量对大粒径（>25 nm）颗粒物液相非均相反应的真实影响。

精准评估气候与健康效应：亟需开发能有效剥离一次排放和长距离气团传输干扰的数值分析框架，以准确测算NPG对区域云凝结核（CCN）的真实贡献率。同时，必须针对高浓度纳米粒子开展跨学科的毒理学和流行病学研究，为制定以公众健康为导向的现代空气质量管理策略提供坚实的科学支撑。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：https://journal.hep.com.cn/fese/EN/10.1007/s11783-026-2178-9

作者：吴志军等 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转发