

空气污染与树木

1. 空气污染的来源

虽然火山喷发会排放有毒的硫基化合物，从而加剧周期性的空气污染，但空气污染之所以持续不断加剧，其根本原因无疑是人类活动。

18 世纪中叶始于英国的工业革命导致大气污染急剧恶化。工厂和家庭取暖中煤炭的广泛使用引发了严重的污染事件，烟雾被困在逆温条件下较暖空气层下方的低层大气中。由烟尘、二氧化硫（SO₂）和氮氧化物混合而成的有毒雾霾事件（由“smoke”和“fog”缩合为“smog”一词），在英国（1873 年和 1952 年）、比利时（1930 年）以及美国宾夕法尼亚州（1948 年）造成了高死亡率。

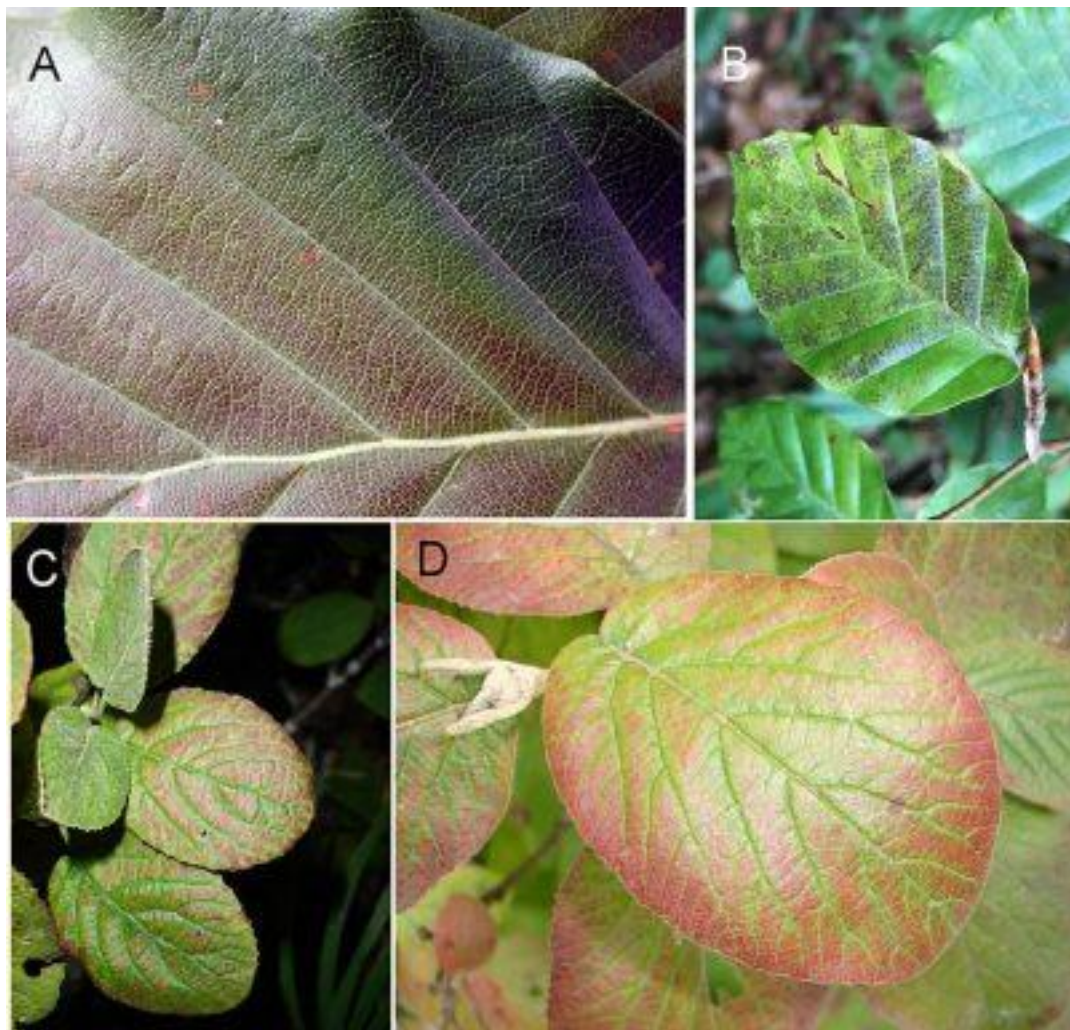


图 1. 臭氧诱导的叶片可见损伤典型示例：欧洲山毛榉（上图）和莢蒾属植物（下图）。这些症状分别来自野外观察（A、C）和臭氧暴露实验（B、D）。[图片来源：Ferretti 等[2]，

20 世纪 40 年代和 50 年代，另一种类型的烟雾污染开始出现，最初发现于美国洛杉矶。在此类污染事件中，臭氧被确定为主要致害因子[1]，其在紫外线照射条件下，由氮氧化物（主要来源于机动车尾气）与挥发性有机化合物（VOCs）发生光化学反应生成，而后者部分亦来源于森林生态系统。

臭氧（O₃）是引发呼吸系统疾病以及植被损伤（包括树木，见图 1）的主要污染物之一[1][2]。

尽管自 20 世纪 70 年代和 80 年代起，美国与欧洲陆续实施了多项监管措施，随后亚洲也采取相关治理政策，但光化学烟雾问题仍持续存在，并已扩散至远超城市范围的地区。

近期一项研究[2]对 2005 年至 2018 年欧洲对流层臭氧浓度进行分析后发现，在欧洲监测网络[3]中，37.3%的站点年均浓度超过 40 ppb（约 80 μg/m³），这一水平已被视为对植被具有毒性的阈值。

树木能够吸收部分空气污染物，这通常被视为改善空气质量的一个积极因素[4]。然而，污染物也会对树木的代谢、生长及健康产生直接的毒害作用，这种毒害效应在很大程度上抵消了上述生态效益。

2. 污染与树木之间的相互作用

光合作用使植物能够通过叶片上的气孔吸收二氧化碳，合成碳化合物并释放氧气，这对所有生物体而言都是一项至关重要的生命过程。这一特性对于应对人为活动造成的二氧化碳累积（温室效应与全球变暖）而言是一种有利条件。然而，叶片同时也会吸收污染物，这些污染物会干扰光合作用、加剧氧化应激、改变新陈代谢，并最终影响树木的生长与健康。

自工业化开始以来，损害便已显现。1866 年，埃利·贝尔泰（Elie Berthet）描述了埃诺煤田地区覆盖着一层细煤尘的树叶[5]。到 19 世纪末，莫里耶讷地区的铝冶炼厂排放大量氟化物，导致针叶树（冷杉、松树、云杉）迅速死亡。到 20 世纪末，法国境内的污染水平已恢复至可接受范围，但在某些俄罗斯冶炼厂附近（如伊尔库茨克附近的北方森林中的欧洲赤松），严重的枯梢现象依然存在。

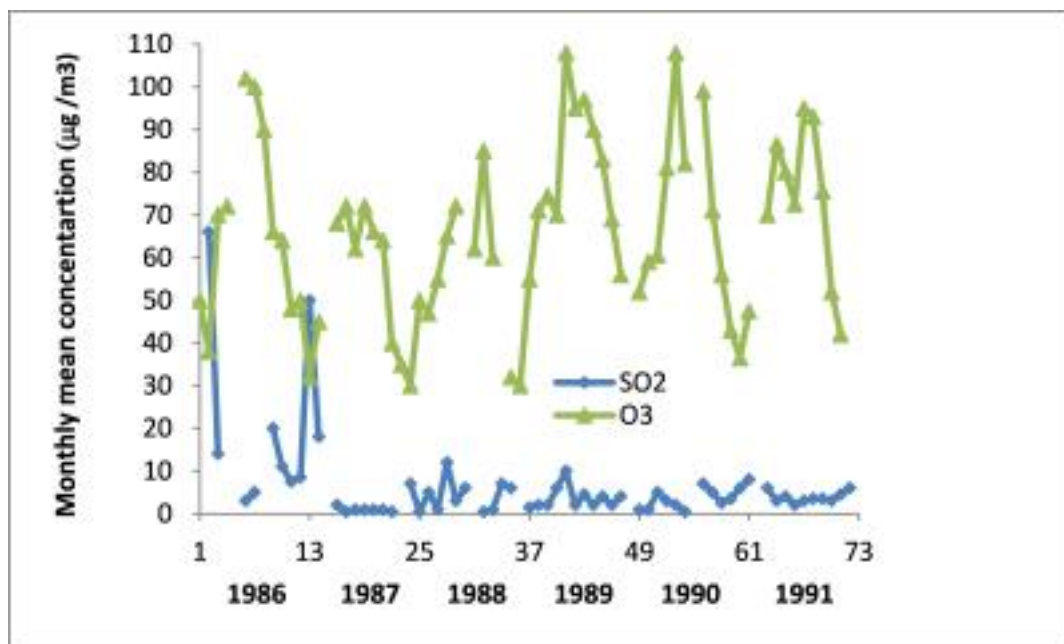


图 2. 1986 - 1991 年间孚日山脉多农山口（海拔 700 米）SO₂ 与 O₃ 月均浓度（单位：mg/m³）。[来源：作者根据阿尔萨斯空气污染监测与研究协会数据绘制]。

1950 年至 1980 年间，二氧化硫（SO₂）——一种由化石燃料、褐煤和煤炭燃烧产生的一次污染物，在工业场地周边（如东德、波兰、前捷克斯洛伐克、英国、加拿大、美国）造成了显著的局部危害。其对光合作用的影响已有充分文献记载。得益于技术进步（脱硫、过滤器），SO₂ 浓度在 20 世纪 80 年代急剧下降，正如 1986 年至 1988 年冬季间在孚日山脉所观察到的那样（图 2）。

与之相反，臭氧浓度在春季和夏季仍居高不下（图 2）。与 SO₂ 不同，臭氧是一种可远距离传输的二次污染物。它已成为解释欧洲与北美针叶树（冷杉、云杉、欧洲赤松）及阔叶树（山毛榉）所出现的“新型森林衰退”的重要候选因子。在法国，DEFORPA 计划（森林衰退与大气污染，1984 - 1991 年）及其他欧洲研究于 20 世纪 90 年代达成共识，森林衰退是多种胁迫因子综合作用的结果。树木往往种植过密，生长在贫瘠的土壤上，且超出了其自然生态分布范围；与此同时，它们还遭受着极端气候事件（如 1976 年的干旱和极寒）的影响。其中，那些先前已因其他胁迫而削弱的树木，受害最为严重。在此背景下，臭氧扮演了加剧因素的角色。

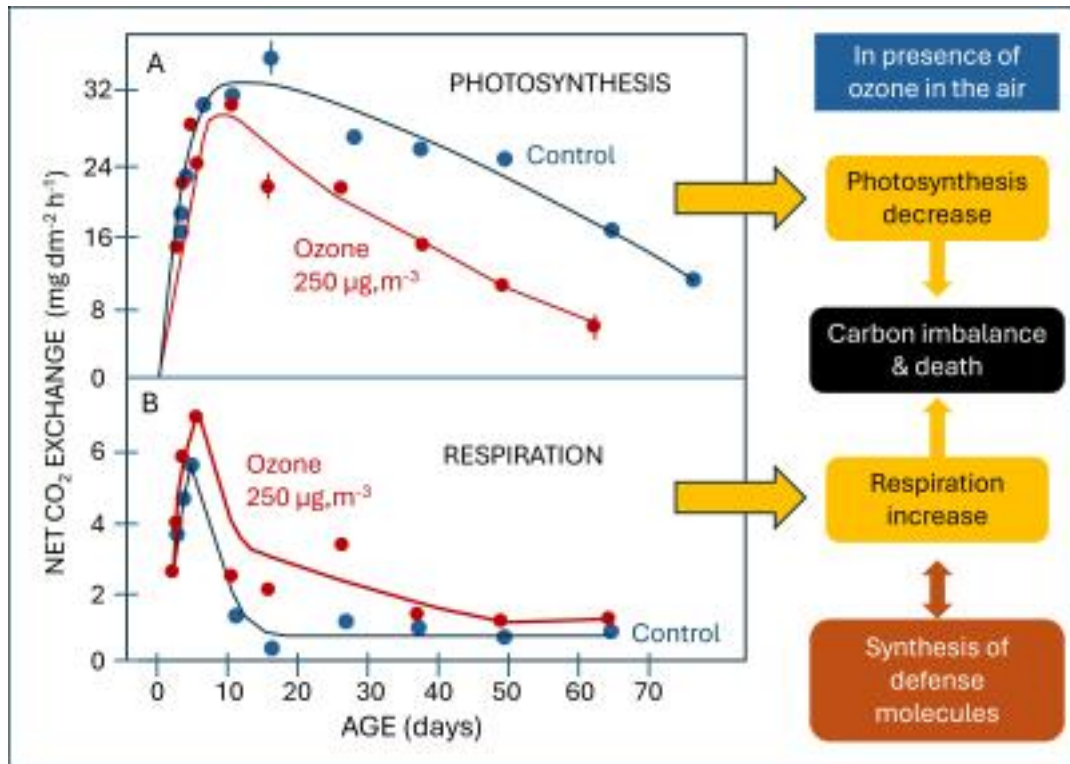


图 3. 臭氧对杨树叶片发育过程中光合作用 (A) 与呼吸作用 (B) 的影响 [图片来源: EEnv 示意图, 基于 Reich [6] 数据绘制]。

近年来, 欧洲约 38% 的落叶乔木树种已观测到臭氧损害的可见症状, 其程度与污染物浓度呈正比; 部分物种较其他物种更为敏感 (见表 1《森林与全球环境变化》)。

臭氧通过破坏叶片细胞代谢发挥它的氧化效应。光合作用减弱, 而呼吸作用增强 (图 3) [6], 以促进防御化合物的合成, 从而导致碳失衡, 进而损害细胞生命 [7]。

尽管欧洲与北美洲的大气臭氧浓度趋于稳定, 但亚洲地区的浓度仍在上升。森林的脆弱性取决于臭氧与气候变化相关因素的共同作用。森林火灾 (如印度尼西亚、亚马孙地区) 通过燃烧释放的氮氧化物加剧臭氧生成; 臭氧可远距离迁移, 超出其生成源地 (图 4)。

与干旱相关的火灾会进一步加重臭氧对光合作用的损害, 从而削弱二氧化碳的封存能力。这种削弱作用既来自火灾期间的直接碳排放, 也源于臭氧对植物代谢的干扰。由此形成恶性循环, 进一步加剧全球变暖

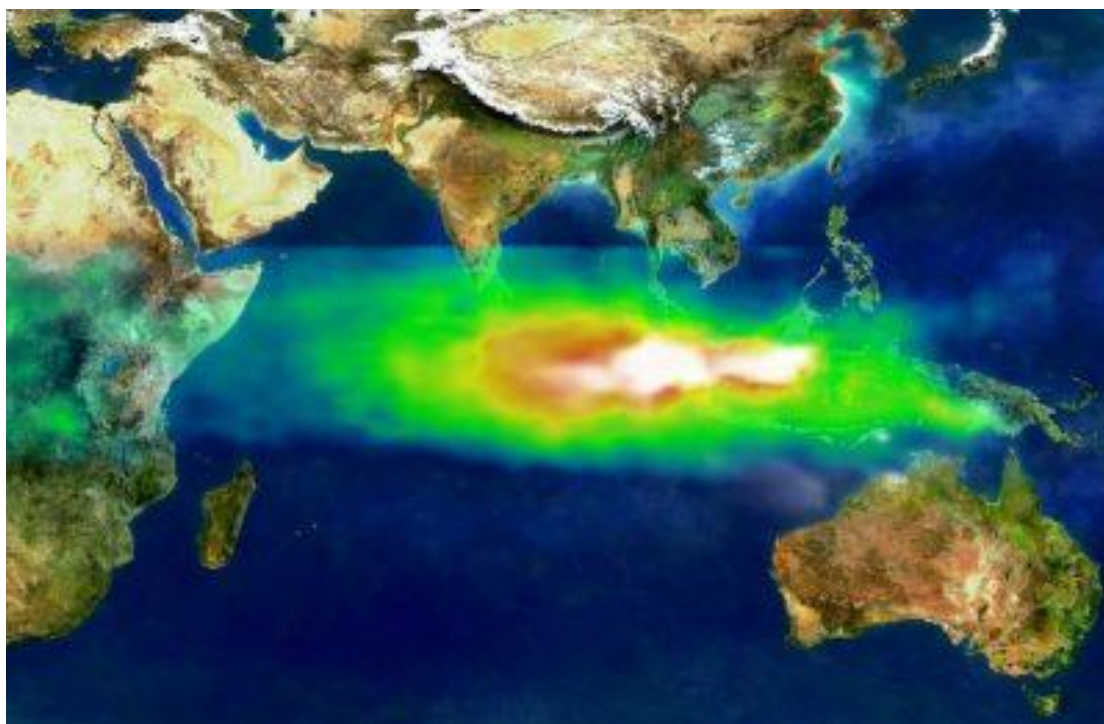


图 4. 1997 年 10 月 22 日, 印度尼西亚森林火灾产生的一团烟雾和臭氧从印度洋延伸至非洲。颜色从绿色到红色表示臭氧浓度逐渐升高。数据来自美国国家航空航天局 (NASA) 地球探测卫星上的总臭氧测绘光谱仪 (TOMS)。[图片来源: NASA, 公有领域, 来自维基共享资源]。

注释与参考文献

缩略图: [图片来源: PxHere]

- [1] Haagen-Smit AJ, Darley EF, Zaitlin M, Hulle H & Noble W (1952). Investigation into damage to plants caused by air pollution in the Los Angeles area. *Plant Physiology*, 27, 18 - 34.
- [2] Ferretti M. et al. (2024). The fingerprint of tropospheric ozone on broad-leaved forest vegetation in Europe. *Ecological Indicators*, 158, 111486.
- [3] It should be noted that the toxicity threshold for humans is $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- [4] Nowak DJ & Van den Bosch M (2019). The effects of trees and forests on air quality and human health in and around urban areas. *Public Health*, 31, 153 - 161.
- [5] Berthet E (1866). *The Coal Miners of Polignies*. Louis Hachette Publishers, Paris, 303 pp.
- [6] Reich PB (1983) Effects of low concentrations of O_3 on net photosynthesis, dark respiration, and chlorophyll content in ageing hybrid poplar leaves, *Plant Physiology*, 73: 291 - 296. <https://doi.org/10.1104/pp.73.2.291>.
- [7] Dizengremel P (2001). Effects of ozone on the carbon metabolism of forest trees. *Plant Physiology and Biochemistry*, 39, 729-742. [https://doi.org/10.1016/S0981-9428\(01\)01291-8](https://doi.org/10.1016/S0981-9428(01)01291-8).