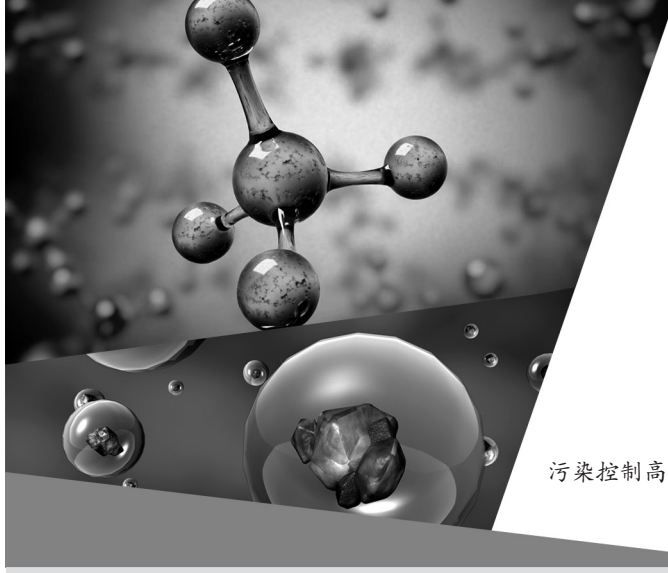


DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2021.162

廖宏, 谢佩芙. IPCC AR6 报告解读: 短寿命气候强迫因子的气候及环境效应 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17 (6): 685-690

Liao H, Xie P F. The roles of short-lived climate forcers in a changing climate [J]. Climate Change Research, 2021, 17 (6): 685-690



## IPCC AR6 报告解读: 短寿命气候强迫因子的气候 及环境效应

廖宏, 谢佩芙

南京信息工程大学 江苏省大气环境监测与  
污染控制高技术研究重点实验室 / 大气环境与装备技术协同创新中心 /  
环境科学与工程学院, 南京 210044

**摘要:** 影响气候变化的大气成分, 依据其在大气中存留的时间, 分为长寿命的温室气体和短寿命的气候强迫因子 (SLCFs)。考虑到 SLCFs 在气候变化和大气环境中的重要作用, IPCC 第六次评估报告 (AR6) 首次有了专门针对 SLCFs 的章节 (第六章)。本文解读 IPCC 报告关于 SLCFs 的主要结论, 特别强调 AR5 以来的最新结论, 包括: SLCFs 的定义、SLCFs 排放和大气含量的变化特征及其对辐射强迫和全球气候的影响、不同共享社会经济路径 (SSP) 情景下 SLCFs 对未来气候变化和空气质量可能的影响, 以及 COVID-19 疫情期间减排对气候变化的影响。文末也讨论了结论的不确定性以及结论对我国的启示。

**关键词:** 短寿命气候强迫因子 (SLCFs); 气溶胶; 甲烷; 气候变化; 空气质量

### 引言

短寿命气候强迫因子 (SLCFs) 不仅会对气候产生影响, 并且在大多数情况下, 它们本身也是空气污染物。SLCFs 主要由气溶胶 (硫酸盐、硝酸盐、铵盐、碳类气溶胶、沙尘和海盐) 和化学反应性气体 (甲烷 ( $\text{CH}_4$ )、臭氧 ( $\text{O}_3$ )、某些卤代化合物、氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ )、一氧化碳 ( $\text{CO}$ )、非甲烷挥发性有机化合物 (NMVOCs)、二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ ) 和氨气等) 组成。其中, 除了  $\text{CH}_4$  和某些卤代化合物寿命约为十年或十年以上, SLCFs 在大气中存留的时间一般为几个小时到几个月不等,

因此它们的浓度在空间上的分布是很不均匀的。SLCFs 要么本身具有辐射效应, 要么可以通过化学反应影响有辐射效应的化学物质的含量。SLCFs 对气候的影响主要发生在它们被排放出来或生成后的前二十年。SLCFs 对气候有冷却或者增暖的作用, 也能够对降水和其他气候变量产生影响。在 SLCFs 中,  $\text{CH}_4$  和某些卤代化合物被包括在《京都议定书》中, 但其他物质并不被包括在此气候条约中, 主要原因是其他物质是在燃烧过程中与  $\text{CO}_2$  共同排放的, 会受到气候减缓措施的间接影响。IPCC 第六次评估报告 (AR6) 在全球和洲际尺度上评估了 SLCFs 排放量以及大气含量的历史

收稿日期: 2021-08-11; 修回日期: 2021-09-02

资助项目: 国家重点研发计划全球变化及应对重点专项项目 (2019YFA0606804)

作者简介: 廖宏, 女, 教授, hongliao@nuist.edu.cn

和未来变化,以及它们如何通过辐射强迫和气候反馈影响地-气系统的能量平衡。此外,还评估了气候和空气质量变化如何受到不同行业 and 不同地区排放的影响,以及为各种环境治理目标而制定的 SLCFs 减排措施的效果。IPCC AR6 得出以下关于 SLCFs 的主要结论。

## 1 SLCFs 的排放和含量的近期演变

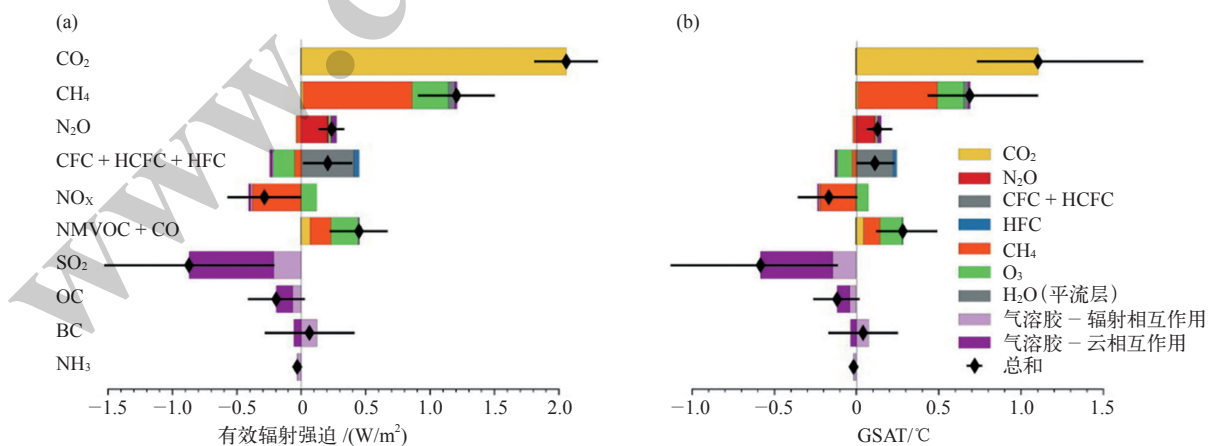
在过去十年中(2010—2019年),排放的地理分布的快速转变导致了大气中 SLCFs 的含量迅速变化(高信度)。来自卫星和地面观测的证据表明, $O_3$ 、气溶胶及其前体物的变化趋势存在很大的区域差异(高信度)。特别是,对流层中  $NO_2$  和  $SO_2$  的柱浓度在北美和欧洲地区呈现出继续下降的趋势(高信度),在东亚地区下降(高信度),但在南亚地区增加(中等信度)。全球大气中的  $CO$  含量持续下降(高信度)。氟代烃(HFCs)的浓度正在增加(高信度)。由于观测有限,对全球碳类气溶胶收支和变化趋势的了解仍然很少,但是背景站的观测表明北半球多个地区的黑碳(BC)已连续多年下降。

从1850年到1980年左右,全球对流层中羟基自由基(OH)的平均浓度没有显著的变化趋势

(低信度)。OH 自由基决定着许多 SLCFs 的化学清除,包括  $CH_4$ 、 $CO$ 、NMVOCs、卤代化合物的清除。地球系统模式(ESMs)和气候-化学模式(CCMs)的结果表明,OH 浓度在1980—2014年间增长了约9%,这种趋势主要是由全球人为  $NO_x$  排放量的增加和人为  $CO$  排放量的减少所驱动的(中等信度)。随着未来 SLCFs 和气候的变化,未来全球 OH 的浓度将取决于 OH 的许多不同驱动因素的相互作用。

## 2 SLCFs 对气候和生物地球化学循环的影响

1750—2019年各种化学物质排放变化产生的有效辐射强迫(ERF)以及相应对全球平均地表气温(GSAT)的影响如图1所示。SLCFs 的排放,特别是  $CH_4$ 、 $NO_x$  和  $SO_2$  的排放,对 ERF 产生了重要影响(高信度)。与 AR5 评估结果一致,在全球范围内, $NO_x$  排放产生的总 ERF 为负,而 NMVOCs 排放产生的总 ERF 为正(高信度)。对于  $CH_4$ ,基于排放计算的 ERF 是基于浓度计算的 ERF 的两倍(高信度)。 $SO_2$  的排放对与气溶胶-云相互作用相关的 ERF 有着决定性贡献(高信度)。排放的化学物质对 GSAT 的贡献基本取决于它们对 ERF 的贡献(高信度)。然而,由于气



注: CFC 为氯氟烃, OC 为有机碳,  $N_2O$  为一氧化二氮, HCFC 为氢氯氟烃。

图 1 1750—2019 年各种化学物质排放变化产生的有效辐射强迫 (a) 以及相应对全球平均地表气温的影响 (b)<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Contribution to effective radiative forcing (ERF) (a) and global mean surface air temperature (GSAT) change (b) from component emissions during 1750—2019 based on CMIP6 models<sup>[1]</sup>

候系统的惯性延迟了 GSAT 对强迫变化的全部响应, 使 SO<sub>2</sub> 排放对 GSAT 变化的贡献比 CO<sub>2</sub> 排放对 GSAT 变化的贡献略高 (相比较于它们对 ERF 的相对贡献), 这是因为排放导致的 SO<sub>2</sub> ERF 的峰值已经出现。

自 20 世纪 70 年代中期以来, 气溶胶及其前体物排放的趋势已经导致了全球平均 ERF 的负强迫值从增加变为减少 (高信度)。然而, 发生转变的时间在不同区域是不相同的, 并且在某些更精细的区域尺度上并未发生这样的转变。从 1850 年到 2014 年, 气溶胶 ERF 的时空分布是高度不均匀的, 这在北半球尤其显著 (高信度)。

在历史时期内, 气溶胶及其 ERF 的变化主要导致地表温度降低, 从而部分抵消了人为排放温室气体所引起的变暖 (高信度)。气溶胶辐射强迫不仅导致本地温度变化, 也会导致遥远地区的温度响应 (高信度)。地表温度响应保留了 ERF 的南北梯度, 即具有半球不对称性。温度响应沿纬圈较为均匀, 但是在北极的温度响应会强烈放大 (中等信度)。

对于寿命相对较短 (例如数月) 的 SLCFs, 一旦排放的变化是持续的, 地表温度响应会很快出现, 并且由于气候系统的热力惯性, 响应会持续增长几年 (高信度)。当温度响应接近最大值时, 响应的速度会变慢, 但是仍需要几个世纪的时间才能达到平衡 (高信度)。对于寿命相对较长 (例如十年) 的 SLCFs, 除了热惯性导致的响应延迟, 温度响应时间还需要加上其生命周期 (高信度)。

活性氮、臭氧和气溶胶会通过沉降和其对辐射的影响而对陆地植被和碳循环产生影响 (高信度)。但是, 由于难以区分各种影响之间复杂的相互作用, 它们对陆地碳汇、生态系统生产力和间接的 CO<sub>2</sub> 强迫的影响量级仍不确定。因此, 与 CO<sub>2</sub> 的直接强迫相比, 这些影响被评估为小一个量级 (高信度), 但是与 O<sub>3</sub> 的直接强迫相比, O<sub>3</sub> 对陆地植被的影响可能会大量增加 O<sub>3</sub> 的正强迫 (低信度)。

考虑到自然过程或大气化学反应的变化,

SLCFs 排放、含量或寿命的变化所引起的反馈被评估为总体上具有冷却效应, 即存在负反馈, 反馈参数为  $-0.20 [-0.41 \sim +0.01] \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。这些非 CO<sub>2</sub> 生物地球化学反馈是 ESMs 估算的, ESMs 自 AR5 以来就不断发展, 从而实现了生物地球化学循环和大气化学的统一表达。然而, 涉及 SLCFs 化学或生物地球化学循环的许多过程层面 (特别是自然排放) 的理解才刚开始, 大多数 SLCFs 气候反馈的大小和正负号都是低信度。

### 3 SSPs 情景下的未来空气质量预测

未来的空气质量, 包括 O<sub>3</sub> 和颗粒物 (PM) 浓度, 在全球到区域尺度上的变化都将主要由排放的变化驱动而不是气候变化驱动 (高信度)。气候变暖将会减少偏远地区地表 O<sub>3</sub> 的浓度 (高信度), 但是会让污染区的 O<sub>3</sub> 浓度增加 (中等至高信度)。未来气候变化对全球地表 PM 浓度或全球大气气溶胶总量的影响是复杂的, 可以增加或减少, 总体来说量级比较小 (中等信度)。但在易发生特殊气象条件的地区, 也不排除气候变化对地表 PM 浓度有更强的局部影响 (低信度)。由于平流层-对流层交换、自然排放 (特别是生物源挥发性有机物排放、野火排放、海洋排放以及闪电 NO<sub>x</sub> 排放等) 对气候变化的响应的不确定性, 使 O<sub>3</sub> 和 PM 对未来气候变化的响应的评估目前是低信度。

共享社会经济路径 (SSPs) 是在典型浓度路径 (RCPs) 的基础上构建的社会经济新情景, 主要涵盖了人口与人力资源、经济发展、科学技术、环境与自然资源、公平原则、政府管理、全球化等 7 个方面, 反映了辐射强迫和社会经济发展间的关联<sup>[2]</sup>。与 RCPs 相比, SSPs 中 SLCFs 排放量级的范围更广, 更好地涵盖了未来空气污染管理方案的多样性 (高信度)。在 SSPs 中, SLCFs 排放趋势的变化除了受到社会经济途径和气候减缓方案的影响外, 也受到空气污染控制水平的影响。因此, SSPs 考虑区域空气污染治理的目标和减排法规实施的效果, 使未来空气



污染物浓度水平及其引起的气候效应量级范围更大。

空气污染的预估结果显示,全球地表 O<sub>3</sub> 和 PM 在有严格的气候减缓措施和空气污染控制的 SSP1-2.6 情景下大幅减少,但在没有气候减缓措施只有较弱的空气污染控制措施的 SSP3-7.0 情景下没有改善甚至进一步恶化(高信度)。在 SSP3-7.0 情景下,预估的 PM 浓度在 2050 年之前在亚洲大部分地区都是增加的,所有大陆地区的地表 O<sub>3</sub> 污染直到 2100 年都是变差的(高信度)。在没有气候减缓措施但有严格的空气污染控制的 SSP5-8.5 情景下,PM 浓度在 2100 年之前持续下降,但是高浓度的 CH<sub>4</sub> 在 2080 年之前都会阻碍全球地表 O<sub>3</sub> 浓度的下降(高信度)。

#### 4 SLCFs 对全球平均地表气温 (GSAT) 影响的预估

相对于 2019 年,在未来的 20 年中,除了长寿命温室气体 (LLGHGs) 引起的变暖外,非常可能所有 SSPs 情景下 SLCFs 的变化都是导致变暖的。考虑所有 SSPs,SLCFs 会导致 2040 年 GSAT 比 2019 年高 0.06 ~ 0.35 °C。在气候和空气污染减缓措施最为严格的情景 (SSP1-1.9 和 SSP1-2.6) 下,SLCFs 导致的短期变暖主要归因于硫酸盐气溶胶的减少。在缺乏气候政策只有较弱的空气污染控制措施的 SSP3-7.0 情景下,SLCFs 导致的近期变暖的主要原因是 CH<sub>4</sub>、O<sub>3</sub> 和 HFCs 浓度的增加,此情景下气溶胶变化的贡献较小。与 SSP3-7.0 情景相比,SSP5-8.5 情景有更强有力的空气污染控制措施。CH<sub>4</sub> 和 O<sub>3</sub> 增加和气溶胶的显著减少,使 SSP5-8.5 情景下 SLCFs 引起的近期升温最高。

到 21 世纪末,GSAT 对各种情景中 SLCFs 变化的响应有很大差异。在 SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下,相较于 2019 年,2100 年 SLCFs 可能引起的增暖范围为 0.4 ~ 0.9 °C。SSP3-7.0 情景下 SLCFs 导致的增暖较为线性,每十年增暖约 0.08 °C,而在 SSP5-8.5 情景下会出现很快的早期

变暖。在 SSP1-1.9 和 SSP1-2.6 情景下,CH<sub>4</sub>、O<sub>3</sub> 和 HFCs 减少导致的变暖减小抵消了气溶胶减少造成的变暖,因此 SLCFs 总体效应是 2100 年的 GSAT 相对于 2019 年可能上升 0.0 ~ 0.3 °C。到 2100 年,SSP2-4.5 情景(气候和空气污染的缓解均为中等水平的情景)中的 SLCFs 可能导致 0.2 ~ 0.5 °C 的变暖,这主要是归因于气溶胶的减少。

假设《关于消耗臭氧物质的蒙特利尔议定书》的基加利修正案和限制排放的各国法规得到实施和有效执行,则相对于 2000 年,HFCs 对 GSAT 的影响从 2050 年起将保持在 +0.1 °C 以下。若考虑基加利修正案之前各国 HFCs 既定法规的执行,HFCs 对 GSAT 的影响到 2050 年为 +0.1 °C,在 2100 年达到 +0.2 ~ +0.3 °C(中等信度)。在向具有低全球变暖潜能的制冷剂过渡的过程中,制冷和空调设备效率的进一步提高将带来额外的温室气体排放的减少(中等信度),从而为减缓气候变暖带来益处,并因为电厂的空气污染物排放相应减少而在一定程度上改善空气质量。

比较 SSP3-7.0 情景和 SSP1-1.9 情景,CH<sub>4</sub>、O<sub>3</sub> 前体物的减少和基加利修正案的全面实施可以使 2040 年 GSAT 有 0.3 [0.2 ~ 0.4] °C 的差异、2100 年 GSAT 有 0.9 [0.6 ~ 1.4] °C 的差异,这对于 2015 年《巴黎协定》而言意义重大。持续的 CH<sub>4</sub> 减排在任何一个地方都是一个很好的选择,能减小 GSAT 短期和长期的增暖量级(高信度),还能在全球范围内降低地表 O<sub>3</sub> 浓度而带来空气质量的改善(高信度)。

#### 5 SLCFs 对空气质量的影响

目前,由住宅和商用的烹饪和取暖产生的排放以及能源生产部门的排放是造成世界人口暴露于人为 PM 的最大原因(高信度),而来自能源和陆面交通运输的排放对人类暴露于臭氧的贡献最大(中到高信度)。不同排放行业对 PM 的贡献有地区差异,在南亚和非洲居家民用排放贡献最大,在欧洲和北美农业排放占主导地位,在中亚和东亚、拉丁美洲和中东工业和能源生产对 PM 的贡

献最大。在非洲以外的大多数地区, 能源和工业排放是 PM<sub>2.5</sub> 的重要来源 (高信度)。影响地表 O<sub>3</sub> 浓度的主要行业在全球基本一致。

快速的脱碳政策能够改善空气质量, 但在短期内不足以实现世界卫生组织 (WHO) 为细颗粒物设定的空气质量标准, 特别是在亚洲的部分地区和其他一些污染严重的地区 (高信度)。额外的 CH<sub>4</sub> 和 BC 的减排将有助于抵消伴随脱碳的 SO<sub>2</sub> 减少所带来的变暖 (高信度)。强有力的空气污染控制以及强有力的气候变化减缓措施的独立实施, 将在 21 世纪末大幅降低空气污染风险 (高信度)。依靠现有技术实施的空气污染控制, 比系统性的气候减缓策略能更快地改善空气质量。但是, 在这两种情况下, 仍有很大一部分人口仍然暴露在超过 WHO 标准的空气污染中。为实现可持续发展目标 (SDG) 设想的其他政策 (例如获得清洁能源、废物管理) 可额外减少 SLCFs。也就是说, 只有综合和多维度的战略才能最有效地实现多重效益。

## 6 COVID-19 对排放、空气质量和气候的影响

COVID-19 疫情期间的排放减少已经导致大多数地区的空气质量得到明显改善, 但导致的全球和区域气候的变化量级并没有超过气候系统的自然变率。2020 年 4 月, 全球人为 NO<sub>x</sub> 排放量减少约 35%, 减少量达到最大值 (中等信度)。除了地表 O<sub>3</sub> 外, COVID-19 期间减排改善了全球大多数地区的空气质量 (高信度)。2020 年, 全球化石燃料燃烧所产生的 CO<sub>2</sub> 排放量下降了 5.8% ~ 13.0%, 这主要是由于交通运输排放量的减少 (高信度)。总体而言, 2020 年 COVID-19 期间产生的净 ERF 可能是很小的正值 (<0.2 W/m<sup>2</sup>), 气溶胶减少所导致的正辐射强迫超过了 CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和卷云三者的变化所引起的负辐射强迫。与气候系统的内部变率相比, 地球系统模式模拟显示这种小的净辐射强迫对全球或区域地表温度或降水没有产生可检测到的影响 (高信度)。

## 7 结论与讨论

IPCC AR6 评估了 SLCFs 的环境和气候效应, 获得的 AR5 以来的最新结论主要包括:

(1) 从 1850 年到 1980 年左右, 全球对流层中羟基自由基 (OH) 的平均浓度没有显著的变化趋势 (低信度), 但从 1980 年以来保持稳定或呈上升趋势 (中等信度)。OH 自由基决定着许多 SLCFs 的化学清除。

(2) SLCFs 的排放, 特别是 CH<sub>4</sub>、NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 的排放, 对有效辐射强迫 (ERF) 产生了重要影响 (高信度)。对于 CH<sub>4</sub>, 基于排放计算的 ERF 是基于浓度计算的 ERF 的两倍 (高信度)。因为 CH<sub>4</sub> 也是对流层 O<sub>3</sub> 的前体物, 因此控制 CH<sub>4</sub> 是改善空气质量和减缓全球变暖双赢的减排措施。

(3) 从 1750 年至今, 气溶胶及其 ERF 的变化主要是导致地表温度降低, 从而部分抵消了人为排放温室气体所引起的变暖 (高信度)。SO<sub>2</sub> 的排放对气溶胶-云相互作用相关的 ERF 有着决定性贡献 (高信度)。

(4) 在未来的 20 年中, 非常可能所有 SSPs 情景下 SLCFs 的变化都会导致气候变暖 (相对于 2019 年)。SLCFs 会导致 2040 年 GSAT 比 2019 年高 0.06 ~ 0.35°C。

(5) 同时考虑 CO<sub>2</sub> 和 SLCFs, 2020 年 COVID-19 期间产生的净 ERF 可能是很小的正值 (<0.2 W/m<sup>2</sup>)。与气候系统的内部变率相比, 地球系统模式模拟显示这种小的净辐射强迫对全球或区域地表温度或降水没有产生可检测到的影响 (高信度)。

IPCC AR6 基于排放清单、利用地球系统模式评估了自 1750 年以来 SLCFs 的浓度变化、ERF 和气候效应, 排放清单是 AR6 评估结论不确定性的最主要来源。工业化以前的自然源排放以及 SLCFs 的浓度普遍缺乏观测的验证, 对快速发展地区当前排放清单的表达也有很大的不确定性。因此, 需要更多的地面和卫星等的观测数据减小地球系统模式结果的不确定性。此外, IPCC AR6 的评估结果也依赖于地球系统模式对化学过程的表达, 目前能贡献

SLCFs 模拟结果的模式数量和模式先进性都还有待进一步提高。

IPCC AR6 关于 SLCFs 的 ERF 和气候效应的评估结果大多是全球平均值,区域性的表达较少,特别是在 SLCFs 浓度比较高的中国区域,CH<sub>4</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、NMVOCs 对 ERF 的贡献以及相对应区域气候的影响还需要更多的评估。■

#### 参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [M/OL]. 2021 [2021-08-01]. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf)
- [2] 曹丽格,方玉,姜彤,等. IPCC 影响评估中的社会经济新情景 (SSPs) 进展 [J]. 气候变化研究进展, 2012, 8 (1): 74-78. Cao L G, Fang Y, Jiang T, *et al.* Advances in shared socio-economic pathways for climate change research and assessment [J]. Climate Change Research, 2012, 8 (1): 74-78

## The roles of short-lived climate forcers in a changing climate

LIAO Hong, XIE Pei-Fu

*Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control/Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology/School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*

**Abstract:** Atmospheric components that can influence climate change can be classified as long-lived greenhouse gases and short-lived climate forcers (SLCFs), according to their lifetimes in the atmosphere. Considering the important roles of SLCFs in climate change and air quality, IPCC AR6 has for the first time the dedicated chapter for the assessment of SLCFs. This work summarizes the major conclusions on SLCFs, especially those since AR5, including the definition of SLCFs, changes in emissions and abundances of SLCFs, the effective radiative forcings of SLCFs and climate responses, projected future changes in climate and air quality under Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), and the impact of COVID-19 lockdown on climate. We also discuss the uncertainties associated with the AR6 conclusions as well as the implications for climate and air quality in China.

**Keywords:** Short-lived climate forcers (SLCFs); Aerosols; Methane (CH<sub>4</sub>); Climate change; Air quality