# 短寿命气候强迫因子的自然源排放及气候反馈:IPCC AR6解读

张华[①],杨镇江[②],苏红娟[①],张丹瑜婷[②],安琪[③④],袁畅[⑤],李帅[⑥],何静怡[①],谢冰[⑦],赵树云[⑤],李柯[②*]

① 中国气象科学研究院 灾害天气国家重点实验室,北京 100081;
② 南京信息工程大学 环境科学与工程学院,江苏 南京 210044;
③ 北京城市气象研究院,北京 100089;
④ 新疆克拉玛依市气象局,新疆 克拉玛依 834000;
⑤ 中国地质大学 环境学院,湖北 武汉 430074;
⑥ 东华大学 环境科学与工程学院,上海 201620;
⑦ 国家气候中心 气候研究开放实验室,北京 100081
*联系人,E-mail:keli@nuist.edu.cn

2022-09-21收稿,2022-11-05接受
国家重点研发计划全球变化及应对重点专项项目(2017YFA0603502)

**摘要** 短寿命气候强迫因子(Short-lived Climate Forcers,SLCFs)对大气污染和气候变化具有重要影响,政府间气候变化专门委员会(IPCC,2021)第六次评估报告(AR6)首次专门设立了关于SLCFs的独立章节,除了对人为源SLCFs评估以外,报告也包含了对于自然源SLCFs及其气候反馈的评估。特别地,在未来气候变暖和人为SLCFs持续减排的背景下,加深对SLCFs的自然源排放及其气候反馈的认识将更为重要。本文从自然源SLCFs排放评估、历史和未来气候情景下的排放变化、SLCFs的气候反馈几个方面解读了AR6中有关的最新结论。未来气候变暖情形下,闪电源$NO_x$、植被源BVOCs、生物质燃烧排放将会增加,土壤源$NO_x$、沙尘、海盐颗粒物和二甲基硫(Dimethlysulfide,DMS)对于气候变化的敏感性难以定量。同时,气候变化驱动着SLCFs的排放量、大气含量或寿命的改变,这些过程整体上造成的负反馈参数为-0.20 W/m²/℃(-0.41~+0.01 W/m²/℃),可能从一定程度上缓解气候变暖。

**关键词**
短寿命气候强迫因子;
气候变化;
自然源排放;
气候反馈;
辐射效应

短寿命气候强迫因子(SLCFs)是指大气寿命相对较短的反应性化合物,包括大气中的气溶胶以及反应性气体:甲烷($CH_4$)、臭氧($O_3$)、某些卤代化合物、氮氧化物($NO_x$)、一氧化碳(CO)、非甲烷挥发性有机物(NMVOCs)、二氧化硫($SO_2$)和氨($NH_3$)等。SLCFs可以由自然源和人为源直接排放(即一次来源),也可以通过大气中的化学反应形成(即二次来源)。SLCFs除了本身作为大气污染物以外,还对气候具有影响与反馈。一方面SLCFs本身具有辐射效应,另一方面具有反应活性的SLCFs可以作为前体物影响其他具有辐射效应的物种浓度,从而对气候造成影响。SLCFs对气候的影响直接体现在其不仅可以影响气候系统的温度(具有增温或冷却的效应),还可以影响降水和其他气候变量。同时,气候变化会引起大多数自然系统以及一些人为活动行业(如农业)的排放变化,导致气候反馈;也能影响大气化学过程,从而影响大气成分(如$O_3$和$CH_4$)而导致气候反馈(图1)。

减缓SLCFs排放对于气候变化和空气污染这两大全球环境议题都有重要的意义。SLCFs作为气候

引用格式:张华,杨镇江,苏红娟,等,2023.短寿命气候强迫因子的自然源排放及气候反馈:IPCC AR6解读[J].大气科学学报,46(4):491-498.
Zhang H,Yang Z J,Su H J,et al.,2023.Natural emissions of short-lived climate forcers and their climate feedbacks:IPCC AR6 interpretation[J].Trans Atmos Sci,46(4):491-498.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20220921001.(in Chinese).

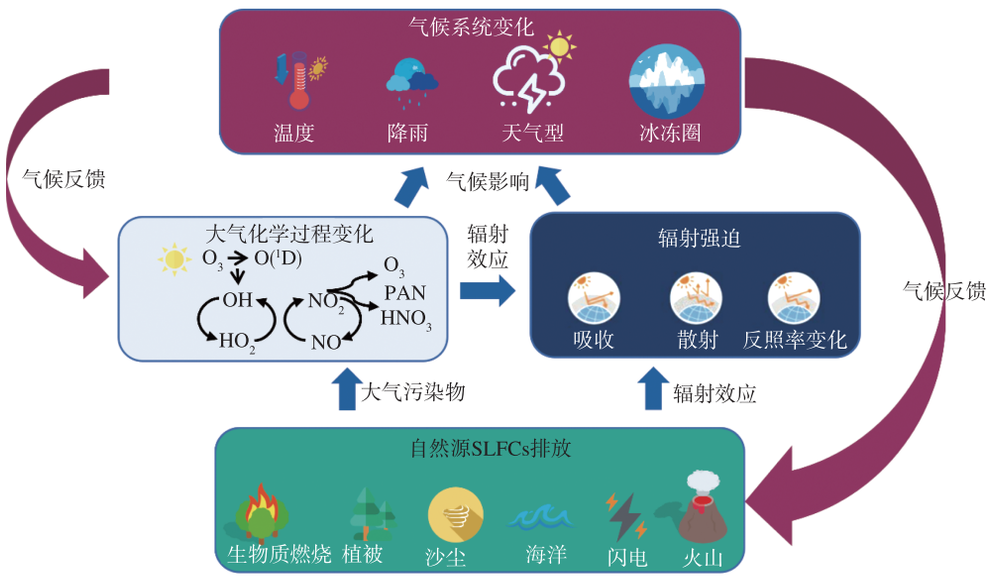


图 1　大气中 SLCFs 自然来源和大气过程以及它们与气候系统的相互作用(修改自 IPCC AR6 WGI 报告,图 6.1)

Fig.1　Natural emissions and atmospheric processes of SLCFs in the atmosphere and their interactions with the climate system (modified from IPCC AR6 WGI, Figure 6.1)

变化因子(如 $CH_4$、HFCs)、空气污染物(如气溶胶、$O_3$)和平流层臭氧的不利影响因素(如 HCFCs),在不同区域有不同程度的管控。目前对于 SLCFs 排放源的认知及控制主要集中在人为排放源。例如除南亚地区以外,全球大部分地区的对流层 $NO_2$ 和 $SO_2$ 的柱浓度均在下降,东亚地区的气溶胶浓度也正在快速下降,这些变化主要是得益于对人为 SLCFs 的有力管控。此前,廖宏和谢佩芙(2021)对 IPCC AR6 中 SLFCs 的排放、大气含量变化特征及其对辐射强迫和全球气候的影响、空气污染与气候相互作用的物理和化学机制进行了解读(廖宏等,2021)。然而,目前对自然源排放,包括露天生物质的燃烧、植被、沙尘、海洋、闪电以及火山活动等的认识和评估较为有限。在 SLCFs 大气浓度逐渐减少的背景下,自然排放的 SLCFs 对大气污染和气候变化将起到更为重要的作用。因此,本文将详细解读 IPCC 第六次评估报告(AR6)对于 SLCFs 的自然源排放和其在未来气候变化背景下的排放变化,以及 SLCFs 通过生物地球化学反馈影响气候变化的综合评估(周波涛,2021;姜彤等,2022;王菲等,2022)。

## 1　SLCFs 的自然源排放估算

当前 SLCFs 自然源排放主要是利用模式估算的,由于模式中相关机制的参数化存在不确定性,而且目前对一些排放发生的自然过程认知有限,所以其时间演变和空间分布具有很大的不确定性。此外,地球系统中许多自然发生的排放过程会受到人类活动的直接干扰(例如,砍伐森林、农业生产)或者间接受到人类活动引起的二氧化碳增加和气候变化所带来的影响,因此不能被视为纯粹的自然排放。本文从闪电、土壤、植被、沙尘、海洋、露天生物质燃烧这六类对气候敏感的自然排放过程,重点介绍 SLCFs 的自然源排放及其在过去和未来气候变化背景下的敏感性。火山气溶胶的辐射效应虽然是气候变率的主要自然驱动因素,但火山活动本身对百年尺度内的气候变化并不敏感,所以本文并未包含。

### 1.1　闪电排放的 $NO_x$

闪电会在对流层上部产生 $NO_x$,贡献了 $NO_x$ 排放总量的约 10%。相较于来自地面排放的 $NO_x$,闪电 $NO_x$ 对 $O_3$、OH 以及 $CH_4$ 的寿命有着与其浓度不成比例的显著影响。虽然可以通过卫星和地面遥感观测获取闪电的全球时空分布,但定量每次闪电的 $NO_x$ 释放量及其垂直分布是十分困难的。如表 1 所示,当前对全球闪电 $NO_x$ 排放总量的估计为 3.2~7.6 Tg/a(以 N 质量计;Griffiths et al.,2020)。一般来说,$NO_x$ 排放的参数化都与云顶高度和闪电强度密切相关,因此预计在更暖的将来,其排放会增加 0.27~0.61 Tg/a/℃(以 N 质量计;Thornhill et al.,2021)。然而,如果使用基于对流、上升气流的质量通量或冰云通量的参数化方案的话,$NO_x$ 排放要么对气候增暖敏感性很低,要么存在负的响应。总的来说,一般认为闪电 $NO_x$ 排放会受到气候变化的影响,目前估算的全球闪电 $NO_x$ 排放总量的不确定性在±200%之内。

**表 1　基于模式评估的自然源排放估值范围**

Table 1　Range of natural source emission valuation based on model assessment

| 自然源排放过程 | 对应 SLCFs 种类 | 排放估算值范围 |
|---|---|---|
| 闪电源 $NO_x$ | $NO_x$ | 3.2~7.6 Tg/a(以 N 质量计) |
| 土壤源 $NO_x$ | $NO_x$ | 4.7~16.8 Tg/a(以 N 质量计) |
| 植被源 BVOCs | 异戊二烯 | 300~600 Tg/a(以 C 质量计) |
| | 单萜烯 | 30~150 Tg/a(以 C 质量计) |
| 沙尘颗粒物 | 沙尘 | 占沙尘 40%~90% |
| 海洋气溶胶 | 海盐 | |
| | DMS | 9~34 Tg/a(以 S 质量计) |
| 生物质燃烧 | CO、$NO_x$、BC、OC | 约占目前全球 CO、$NO_x$、BC、OC 排放的 30%、10%、15%、40% |

### 1.2　土壤排放的 $NO_x$

土壤 $NO_x$ 的排放与复杂的生物/微生物硝化和反硝化过程有关,这些过程对温度、降水、土壤湿度、碳和养分含量以及生物群本身存在着非线性的响应。通过基于观测约束的化学传输模式和植被模型的评估来看,土壤 $NO_x$ 排放的范围在 4.7~16.8 Tg/a(以 N 质量计;Young et al.,2018)。在气候变暖背景下,由于酶活性会随着气温的升高而增加,非农业生态系统的总固氮量预计将比 2000 年增加 40%,但预计 NO(和 $N_2O$)的排放速率变化将主要取决于降水和蒸散通量的变化。目前地球系统模式考虑的生物物理和生物地球化学过程非常有限,很难对土壤 $NO_x$ 进行非常充分的气候敏感性研究。因此,虽然对土壤 $NO_x$ 排放强度的评估在过去十年中得到了较好的约束,但在地球系统模式中仍然缺乏对土壤 $NO_x$ 排放过程的充分表征及对其如何从土壤冠层中逃逸的过程描述,因而无法定量评估未来气候变化对土壤 $NO_x$ 的影响。

### 1.3　植被排放的挥发性有机物

植被排放的挥发性有机物(Biogenic Volatile Organic Compounds,BVOCs)种类繁多,主要是异戊二烯和单萜烯,也包含倍半萜烯、烯烃、醇、醛、酮等。BVOCs 在全球大气成分变化中起着基础性的作用,其光化学氧化产物可以影响臭氧和有机气溶胶的收支,影响甲烷和其他活性成分的大气寿命。不同模型对全球 BVOCs 或其中单一物种排放的估计存在很大不确定性。全球异戊二烯排放估计值的上下限相差 2 倍,为 300~600 Tg/a(以 C 质量计),全球单萜烯排放估计值相差 5 倍,为 30~150 Tg/a(以 C 质量计;Messina et al.,2016)。由于许多地区监测数据覆盖度较低且缺乏全年的观测,目前对全球 BVOCs 排放量的估算具有一定的挑战性。近些年,已经发展了几种观测方法来提升对 BVOCs 排放的评估,包括观测森林环境中 OH 的损耗率以及卫星监测的甲醛浓度等间接方法。最近,有研究使用卫星红外辐射观测来直接对异戊二烯进行反演(Wells et al.,2020)。这些观测方法都显示全球模式中的参数化方法在模拟 BVOCs 排放上(特别是高排放地区)存在不足。

全球 BVOCs 排放对环境变化有较高的敏感性,包括气候、大气 $CO_2$、土地植被组成以及覆盖率的变化。近期基于全球模拟的研究一致认为,自工业化以来全球异戊二烯的排放量减少了 10%~25%,这主要是由人为土地利用/覆盖变化(LULCC)驱动的。但对单萜烯和倍半萜烯排放历史演变的研究较少。未来全球异戊二烯和单萜烯的排放在很大程度上取决于未来的气候和土地利用情景。BVOCs 的排放对未来基于土地的气候变化减缓策略(包括造林和生物能源)十分敏感,生物能源的影响又取决于对作物的选择。目前,大多数的 CMIP6 模式都采用十分简单的参数化方案,并且预测全球 BVOCs 排放量会随着温度升高而增加,这一结论实际上反映出全球模式中 BVOCs 排放参数化方案缺乏多样性,没有全面考虑上述讨论的一系列复杂的影响排放的过程。

总体而言,从工业革命前到现在,全球异戊二烯的排放量下降了 10%~25%,但仍存在一定的不确定性。全球单萜烯和倍半萜烯排放的历史演变还没有确定的结论。BVOCs 的未来变化与气候和土地利用的变化密切相关,并且对基于土地的气候变化减缓策略非常敏感。BVOCs 排放的净响应也是不确定的,主要因为自然排放过程的复杂性、当前模型中考虑的细节过程仍不完善、在观测上也很难对其进行约束。

### 1.4 沙尘颗粒物

沙尘颗粒物排放到大气是一个自然过程，其排放的发生和强度受土壤属性、植被以及近地表风场的控制，这使得沙尘排放对气候、土地利用和土地覆盖的变化十分敏感。此外，沙尘还可以通过农业、交通车辆、建筑施工、采矿等人为活动直接排放。在全球沙尘排放中，估算的人为贡献占比从10%到60%不等，表明对全球沙尘收支中人为贡献的认识存在相当大的不确定性。根据古气候记录重建全球沙尘（沉积）的结果表明，冰期和间冰期不同气候状态之间存在2~4倍的变化。而且，对工业革命以来全球沙尘排放源演变的研究十分有限。由于气溶胶对气候系统的作用中很大一部分是来自全球沙尘循环和气候系统之间的反馈作用，而且这一反馈作用在区域尺度上会增加一个数量级，因此非常有必要开展更加深入的研究。总之，一般认为大气沙尘的来源和含量对气候和土地利用的变化很敏感，但定量估计沙尘排放对气候变化响应的可信度仍较低。

### 1.5 海洋气溶胶及其前体物

海洋气溶胶由二次气溶胶和一次海盐颗粒物组成，二次气溶胶是由排放的前体物，如二甲基硫（DMS）和许多其他BVOCs氧化产生的。海盐颗粒物是由海盐和一次有机气溶胶（POA）组成的，它是由风导致的海浪破碎以及直接的机械扰动产生的。虽然目前对海盐排放的认识有了很大的提高，但是对其形成途径和影响因素的认识仍很不足。海盐颗粒物的排放速率主要受到风速控制，不过有证据表明包括海表温度和盐度等在内的其他因素也很重要。海洋POA是海盐中最主要的亚微米成分，是由海洋生物活动产生的。由于目前对产生这些颗粒的生物过程并不是很清楚，导致对全球海洋POA排放的估计存在着很大的不确定性。此外，海盐颗粒物的大小和化学组成，以及这些颗粒物随着不断变化的气候因素和海洋生物如何演变，仍然具有很大的不确定性。

DMS是大气硫化物最大的自然来源，由海洋浮游植物产生，并通过风引起的表层海水混合而从排放到大气中的。DMS氧化产生硫酸盐气溶胶，有助于形成云凝结核（CCN）。据Lana et al.（2011）的海洋表面测量和卫星反演估计，全球DMS通量的范围为9~34 Tg/a（以S质量计，其中可能性最高的范围是18~24 Tg/a）。DMS的产生和由此导致的排放已被证明与多种因素有关，包括气候变暖、富营养化、海洋酸化。然而，从生理学到生态学，当前对控制DMS排放机制的认识都存在着很大的不确定性，进而也限制了对其排放在过去和未来演变的认识。

### 1.6 露天生物质燃烧

露天生物质燃烧（包括森林、草原、泥炭灰、农业废弃物燃烧）分别约占目前全球CO、$NO_x$、BC、OC排放的30%、10%、15%、40%（van Marle et al.，2017；Hoesly et al.，2018）。野火在一些大气化学-气候反馈机制中发挥了重要作用，而且发生在人口密集地区附近的野火会引发严重的空气污染事件。利用卫星产品可以估算生物质燃烧的排放量。在有卫星观测之前的时期，野火历史变化可以通过野火代用数据（如沉积物中的炭黑或冰壳中的左旋葡聚糖）和气象站记录的能见度数据进行估算。随着遥感技术的进步，小范围野火的探测也得到了改进，某些地区高分辨率卫星监测的野火面积与地面实测数据的一致性也得到了提升，尤其是在农业秸秆燃烧的地区。根据最新的估算，生物质燃烧排放在1750—2015年期间略有增加，并在20世纪90年代达到峰值，之后逐渐减少。因此，由于工业革命前和现在的排放之间差异较小，从而导致生物质燃烧的SLCFs的辐射强迫较低，对气候的影响也可能较低。未来气候变暖，特别是温度和降水的变化，会增加野火的风险，也会影响野火的喷射和烟羽高度，但未来野火的发生及排放在很大程度上取决于人口密度、土地利用和野火管理等人为因素。

总之，过去AR5中通过减少关键因子的不确定性，对生物质燃烧排放的认识有了新的改进。然而，对剩余不确定性的系统评估是有限的，其中，由排放因子造成的不确定性的下限为30%，而燃烧活跃估计造成的不确定性更大，特别是在区域一级。总的来说，对当前全球生物质燃烧的SLCF排放及其在卫星时代的演变情况的处于中等置信度。工业化前到20世纪80年代，生物质SLCF排放的置信度从低变化到中等，这依赖于几个替代数据的整合，其空间代表性有限。然而，工业化前排放的绝对值的不确定性仍然很高，限制了对辐射强迫估算的置信度。

## 2 SLCFs的气候反馈

气候变化会引起大气成分变化和自然过程扰动而产生辐射强迫，进而放大（正反馈）或减小（负反馈）初始的气候扰动。量化这些生物地球化学反馈，对于更好地评估目前气候变化减缓政策的预期效果和全球碳收支是非常重要的。本文中对气候反馈的介绍主要集中于非$CO_2$生物地球化学反馈过程，其指随着地表气温变化，大气化学成分（如甲

烷、一氧化二氮、臭氧、气溶胶等,但除 $CO_2$、水汽外)的含量发生变化而影响地球辐射收支造成的气候影响,这些大气成分含量变化与自然源 SLCFs 排放变化高度相关。

反馈参数 $\alpha$(单位:$W/m^2/℃$)量化了给定全球平均地表温度(GSAT)变化时的大气顶净能量通量的变化。许多气候变量均能影响大气顶能量收支,反馈参数可以分解为一阶项的总和

$$\alpha = \sum_x \frac{\partial N}{\partial x}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}T}。$$

其中:$x$ 表示可以直接影响大气顶能量收支的地球系统变量;$N$ 表示大气顶净辐射通量;$T$ 代表全球地表气温,具体计算方法可参考赵树云等(2021)对 IPCC 报告中地球气候系统中反馈机制的解读。非 $CO_2$ 的生物地球化学反馈作用的时间尺度从几年到几十年不等,对气候敏感性和减排政策具有重要影响。反馈参数是通过地球系统模式来量化的,地球系统模式通过将物理气候和大气化学与陆地和海洋生物地球化学耦合来完善化学-气候模式(CCMs)的复杂程度。当前的地球系统模式已经包含了较多的反馈过程,可以对反馈参数进行更可靠的评估。通过 CMIP6 多模式比较计划下气溶胶化学模式比较计划(AerChemMIP)进行的一系列统一的试验,可以保证针对反馈参数的量化估计的一致性,本节主要介绍依据这种多模式分析来获得的最佳估算值(表 2)。基于 AerChemMIP 使用统一方法估算了 $\alpha$ 的中值和 5%~95%范围。在本节的估算中,未讨论气候变化通过碳循环影响初始气候扰动的过程。

对表 2 中给出的不同非 $CO_2$ 的生物地球化学气候反馈过程进行介绍。

**表 2　基于 AerChemMIP 评估的不同非 $CO_2$ 的生物地球化学气候反馈过程导致的反馈参数 $\alpha_x$ 的中值和可能范围(来源:IPCC AR6 WGI 报告,表 6.8)**

Table 2　Assessed central estimates and the very likely ranges (5%—95%) of non-$CO_2$ biogeochemical feedback parameter ($\alpha_x$) based on the AerChemMIP ensemble estimates (source: IPCC AR6 WGI, Table 6.8)

| 非 $CO_2$ 的生物地球化学气候反馈过程 | AerChemMIP 模式数量 | 评估的反馈参数 $\alpha_x$ 的中心值和可能范围/($W \cdot m^{-2} \cdot ℃^{-1}$) |
|---|---|---|
| 闪电 | 4 | −0.010 (−0.04~+0.02) |
| 生物源 VOC | 4 | −0.05 (−0.22~+0.12) |
| 沙尘 | 6 | −0.004 (−0.02~+0.01) |
| 海盐 | 6 | −0.049 (−0.13~+0.03) |
| DMS | 3 | 0.005 (0.0~0.01) |
| 臭氧 | 4 | −0.064 (−0.08~−0.04) |
| 甲烷寿命 | 4 | −0.030 (−0.12~+0.06) |
| 总的效应 | | −0.200 (−0.41~+0.01) |

### 2.1　气候-闪电 $NO_x$ 反馈

气候变化会影响闪电 $NO_x$ 的排放,闪电 $NO_x$ 排放的增多不仅会导致对流层臭氧浓度增加、甲烷寿命缩短,而且还会通过改变大气氧化剂促进硫酸盐和硝酸盐气溶胶的形成,进而抵消臭氧的正强迫作用。闪电 $NO_x$ 对气候变化的响应仍然不确定,且高度依赖于地球系统模式的闪电参数化方案。对 AerChemMIP 多模式预估结果进行平均后发现,在未来气候变暖情况下,闪电 $NO_x$ 排放增加会产生净的负气候反馈。AerChemMIP 的所有模式都使用了云顶高度闪电参数化,预测到闪电频次会随着气候变暖而增加,然而考虑到闪电参数化响应的依赖性,目前并不能排除可能存在正的气候-闪电 $NO_x$ 反馈。

### 2.2　气候-BVOC 反馈

BVOCs(如异戊二烯和萜烯)是由陆地植被和海洋浮游生物产生的,进入大气的 BVOCs 及其氧化产物会导致二次有机气溶胶(SOA)的形成,产生负辐射强迫,而其导致的臭氧浓度与甲烷寿命的增加则会产生正强迫。人们认为 BVOCs 排放具有气候反馈,部分原因是在当前条件下发现了 BVOCs 排放对温度有高度依赖性。BVOCs 对未来气候和 $CO_2$ 浓度水平变化的响应仍不确定。气候-BVOC 的反馈参数的估算通常基于全球模式,这些模式在排放参数化、BVOCs 形态、SOA 形成机制以及与臭氧的化学反应等方面的复杂程度有所不同。根据近期研究表明,观测和模式估算的生物 SOA(通过 BVOC 排放的变化)反馈在 −0.06 到 −0.01 $W/m^2/℃$ 之间。基于 AerChemMIP 集合对气候-BVOC 反馈参数的中心估计表明,气候变化导致来自 BVOCs 的 SOA 的增加将造成强大的冷却效应,可能会超过臭氧增加和甲烷寿命增加带来的变暖,但不确定性很大。

### 2.3　气候-沙尘反馈

沙尘是大气中质量含量最高的气溶胶,它通过与长波和短波辐射的相互作用来影响气候系统,并有助于云凝结核(CCN)和冰核(INP)的形成。沙尘排放对气候变化很敏感(例如气候可以改变干旱地区的范围),因此推测气候-沙尘反馈可能是气候系统中的一个重要反馈过程。近期通过对沙尘的短波吸收特性的进一步认识,以及发现沙尘颗粒比之前所认知的要

大,进而修正了矿物沙尘所造成的辐射强迫很小的结论。最近的一项研究指出,全球模式低估了大气中的粗粒沙尘量,这一不足可能会导致高估沙尘排放使气候系统变暖的可能性。在未来气候变化情景下,沙尘排放量的模式预测结果从增加到减少不等,因此对气候-沙尘反馈的评估具有高度不确定性。Kok et al.(2018)仅根据沙尘直接辐射效应的变化,估计沙尘-气候反馈参数在-0.04~+0.02 W/m$^2$/℃。基于AerChemMIP集合(表2)估算的气候-沙尘反馈参数中值和5%~95%范围均在已发表的估计范围内,但是$\alpha$的大小和符号在不同模式中不同。

### 2.4 气候-海盐反馈

来自海表的海盐排放通过形成CCN直接或间接影响气候,海盐排放对海表温度、海冰范围和风速很敏感,因此有可能受气候变化的影响。然而,海盐气溶胶的气候反馈存在很大的不确定性,因为不同模式对排放有多种不同的参数化表达(许多只设置海盐排放量),这些排放表征依赖于上述提及的环境要素、影响海盐寿命的大气化学和物理过程以及气溶胶-云的相互作用。还需要开展更多工作来确定海盐和POA排放是如何响应全球变暖、海洋酸化和大气环流变化下的海洋生物和化学过程的变化,以及如何影响CCN和INP形成。仅包含了海盐排放的AerChemMIP模式结果表明,海盐存在负气候反馈,但反馈参数的范围很大(-0.13~+0.03 W/m$^2$/℃),表示其不确定性很大。

### 2.5 气候-DMS反馈

二甲基硫(DMS)由海洋浮游植物产生,被释放进大气后可形成硫酸盐气溶胶和CCN,海洋排放的DMS会响应温度、太阳辐射、海洋混合层深度、海冰范围、风速、营养物质循环或由海水酸化和气候变化引起的海洋生态系统演变,以及DMS转化成CCN的大气过程等方面的变化,进而产生气候反馈。不同模式对相关的生物地球化学过程以及DMS通量的影响具有不同程度的描述,因此在气候变化情况下,由于对DMS排放强度的估算存在分歧,导致DMS-硫酸盐-云反照率反馈存在很大不确定性。近些年来,一些利用pH和DMS总产量之间的经验关系开展的新的模式研究发现,在海水酸化和气候变化的共同作用下,全球DMS产量减少,进而导致了较强的正气候反馈。然而,还有研究认为由于海洋生态系统的区域变化复杂且具备补偿性,因此全球正反馈不会很强烈。AerChemMIP多模式分析表明,DMS的正反馈较小(表2),这与最近的研究结果一致,但$\alpha$值的大小存在很大的不确定性。

### 2.6 气候-野火反馈

野火是SLCFs的主要排放源之一,气候变化有可能增强野火活动,从而增加SLCFs的排放产生反馈。气候变化驱动的野火增多可能会抵消臭氧增加和甲烷寿命缩短(因为OH自由基增加)造成的反馈,从而使气溶胶反馈成为主导,产生不确定的净效应。Arneth et al.(2010)评估了包含野火气溶胶排放的气候-野火反馈,$\alpha$值在-0.03~+0.06 W/m$^2$/℃范围内。最近的一项研究估算表明,野火气溶胶的气候反馈大于BVOCs的气候反馈,$\alpha$值等于-0.15(-0.24~-0.05) W/m$^2$/℃。显然,对于与野火相关的非$CO_2$生物地球化学反馈的评估是非常不确定的,原因是对该过程中气候、植被、野火动力学以及大气化学之间的相互作用,及以上因子在当前地球系统模式中的认识有限。AerChemMIP中的一些地球系统模式包含了对野火动力学的表述,但并没有建立它们与大气化学的相互作用。考虑到AerChemMIP中地球系统模式的极大不确定性与局限性,很难对气候-野火反馈进行定量评估。

### 2.7 气候-臭氧反馈

现有研究表明,臭氧浓度对未来气候变化的响应会导致潜在气候-大气化学反馈。当前的化学-气候模式预测结果较为一致,热带平流层低层臭氧水平下降原因在于地表增暖加强了对流层$O_3$污染区的上升气流,从而驱动了布鲁尔-多布森(Brewer-Dobson)环流的加强。此外,模式还预测到,加强的布鲁尔-多布森环流增强了下沉气流,致使温带平流层中的臭氧水平增加。这些平流层臭氧变化导致了全球负的净臭氧平均辐射反馈。对流层臭氧表现出了一系列对气候的响应,模式普遍认为,气候变暖将导致热带对流层低层$O_3$因水汽增加而减少,而副热带至中纬度对流层上层$O_3$则会由于闪电和平流层向对流层输送的增加而增加。有研究预估,气候因素造成的全球平均对流层臭氧的变化会产生较小的正反馈,而Heinze(2019)则根据模式结果估算得到了一个小的负反馈。此外,这些臭氧反馈会引起平流层水汽的变化,从而放大平流层的臭氧反馈。近年来有几项模式研究通过对流层和平流层臭氧的综合变化或单独对比,估算了气象驱动的臭氧对气候的反馈强度。其中的一项研究表明没有明显气候反馈(Marsh et al.,2016),而其他研究则称平衡态气候敏感度降低了约7%至20%。这一气候-臭氧反馈参数的估计值与具体模式有很大关系,取值范围为-0.13~-0.01 W/m$^2$/℃,但是目前人们一致认为其值为负。基于AerChemMIP集合估算的气候-臭氧

反馈参数中值和 5%~95%范围在已公布的估计值范围内,但更接近下限。该气候-臭氧反馈因子不包括上文单独讨论的闪电变化对臭氧的反馈。

### 2.8 气候-$CH_4$ 寿命反馈

气候暖湿化会增加 OH 自由基和大气氧化性,从而缩短大气中甲烷的寿命,产生负反馈。另一方面,因为 OH 自由基会被甲烷去除,OH 的反馈会导致气候-甲烷寿命反馈被放大。利用 Voulgarakis et al.(2013)的多模式研究结果,Heinze(2019)估计气候-甲烷寿命反馈的 $\alpha$ 值为$-0.030\pm0.01$ W/m$^2$/℃。基于 AerChemMIP 集合估算的 $\alpha$ 中心值在这一估算范围内,但相比存在更大的不确定性。

## 3 结论与讨论

IPCC AR6 对自然源 SLCFs 排放量及变化和气候反馈进行了估算,但是目前估算具有较大的不确定度,主要结论如下:

1)闪电源 $NO_x$、土壤源 $NO_x$、植被 BVOCs、海洋生物排放的 DMS、生物质燃烧的排放有较为定量的评估,对沙尘颗粒物中自然源贡献占比、海洋中 POA 的排放过程的认知不确定性还很大。

2)未来闪电源 $NO_x$、植被 BVOCs、生物质燃烧排放将会随着气候变暖排放量增加,但是模式中的参数化方案对于这些自然排放复杂性的描述均有待完善,观测上也难以约束。由于相关机制的研究和模式中的描述有限,土壤源 $NO_x$、沙尘、海盐颗粒物和 DMS 对于气候变化的敏感性仍难以定量。

3)气候变化也驱动着 SLCFs 的排放量、大气含量或寿命的改变,这些过程整体上具有冷却效应,负反馈参数为 $-0.20$ W/m$^2$/℃,5%~95%范围为 $-0.41$~$+0.01$ W/m$^2$/℃,进而减小了气候敏感性。

4)反馈参数 $\alpha$ 值的范围较大,说明大多数因子的量级、正负号及总的非 $CO_2$ 生物地球化学反馈的置信水平仍然很低。目前认知水平下的各模式对相关化学和生物地球化学过程的表述不尽相同,从而造成了这种巨大的不确定性。

综上所述,当前对自然排放过程的研究相对有限以及对相关过程参数化的不确定性是 AR6 评估自然源 SLCFs 不确定性的最主要来源。随着当前国际社会对碳中和发展目标的逐步明确,在 SLCFs 排放进一步管控下,持续的气候增暖导致自然源排放过程更需要重视。为了更好地认识自然源排放及气候反馈,首先,需要加深对这些自然排放过程的系统性研究,发展更为完善的参数化方案以减小模式中对相关机制描述的不确定性;其次,要利用更为全面的观测数据(比如卫星、长期地面观测数据等)来对地球系统模式中的相关过程进行验证和约束;最后,目前 IPCC 关于自然源排放的评估均为全球性的结果,亟须在气候敏感地区对自然源 SLCFs 排放、气候影响与反馈开展针对性的研究。

## 参考文献(References)


Arneth A, Harrison S P, Zaehle S, et al., 2010. Terrestrial biogeochemical feedbacks in the climate system[J]. Nat Geosci, 3(8): 525-532. doi: 10.1038/ngeo905.

Griffiths P T, Murray L T, Zeng G, et al., 2020. Tropospheric ozone in CMIP6 simulations[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 21(5): 4187-4218. doi: 10.5194/acp-21-4187-2021.

Heinze C, 2019. ESD reviews: climate feedbacks in the Earth system and prospects for their evaluation[J]. Earth System Dynamics. 10(3): 379-452. doi: 10.5194/esd-10-379-2019.

Hoesly R M, Smith S J, Feng L Y, et al., 2018. Historical (1750—2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS)[J]. Geosci Model Dev, 11(1): 369-408. doi: 10.5194/gmd-11-369-2018.

IPCC, 2021. Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge and New York: Cambridge University Press.

姜彤,翟建青,罗勇,等,2022.气候变化影响适应和脆弱性评估报告进展:IPCC AR5 到 AR6 的新认知[J].大气科学学报,45(4):502-511.
Jiang T, Zhai J Q, Luo Y, et al., 2022. Understandings of assessment reports on climate change impacts, adaptation and vulnerability: progress from IPCC AR5 to AR6[J]. Trans Atmos Sci, 45(4): 502-511. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20220529013. (in Chinese).

Kok J F, Ward D S, Mahowald N M, et al., 2018. Global and regional importance of the direct dust-climate feedback[J]. Nat Commun, 9: 241. doi: 10.1038/s41467-017-02620-y.

Lana A, Bell T G, Simó R, et al., 2011. An updated climatology of surface dimethlysulfide concentrations and emission fluxes in the global ocean[J]. Glob Biogeochem Cycles, 25(1): GB1004. doi: 10.1029/2010GB003850.

廖宏,谢佩芙,2021.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,17(6):685-690. Liao H, Xie P F, 2021. The roles of short-lived climate forcers in a changing climate[J]. Clim Change Res, 17(6): 685-690. doi: 10.12006/j.issn.1673-1719.2021.162. (in Chinese).

廖宏,高瑜成,陈东林,等,2021.空气污染-气候相互作用:IPCC AR6 的结论解读[J].大气科学学报,44(5)658-666. Liao H, Gao Y C, Chen D L, et al., 2021. Assessment of air quality-climate interactions in IPCC AR6[J]. Trans Atmos Sci, 44(5)658-666. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210823011. (in Chinese).

Marsh D R,Lamarque J F,Conley A J,et al.,2016.Stratospheric ozone chemistry feedbacks are not critical for the determination of climate sensitivity in CESM1(WACCM)[J].Geophys Res Lett,43(8):3928-3934.doi:10.1002/2016GL068344.

Messina P,Lathière J,Sindelarova K,et al.,2016.Global biogenic volatile organic compound emissions in the ORCHIDEE and MEGAN models and sensitivity to key parameters[J].Atmos Chem Phys,16(22):14169-14202.doi:10.5194/acp-16-14169-2016.

Thornhill G,Collins W,Olivié D,et al.,2021.Climate-driven chemistry and aerosol feedbacks in CMIP6 Earth system models[J].Atmos Chem Phys,21(2):1105-1126.doi:10.5194/acp-21-1105-2021.

van Marle M J E,Kloster S,Magi B I,et al.,2017.Historic global biomass burning emissions for CMIP6 (BB4CMIP) based on merging satellite observations with proxies and fire models (1750—2015)[J].Geosci Model Dev,10(9):3329-3357.doi:10.5194/gmd-10-3329-2017.

Voulgarakis A,Naik V,Lamarque J F,et al.,2013.Analysis of present day and future OH and methane lifetime in the ACCMIP simulations[J].Atmos Chem Phys,13(5):2563-2587.doi:10.5194/acp-13-2563-2013.

王菲,张华,刘梦婷,等,2022.气候反馈对温度空间模态的依赖性:IPCC AR6 解读[J].大气科学学报,45(6):826-834. Wang F,Zhang H,Liu M T,et al.,2022.Dependence of climate feedbacks on temperature patterns:interpreting IPCC AR6[J].Trans Atmos Sci,45(6):826-834.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20220928001.(in Chinese).

Wells K C,Millet D B,Payne V H,et al.,2020.Satellite isoprene retrievals constrain emissions and atmospheric oxidation[J].Nature,585(7824):225-233.doi:10.1038/s41586-020-2664-3.

Young P J,Naik V,Fiore A M,et al.,2018.Tropospheric ozone assessment report:assessment of global-scale model performance for global and regional ozone distributions,variability,and trends[J].Elem Sci Anthropocene,6(10).doi:10.1525/elementa.265.

赵树云,孔铃涵,张华,等,2021.IPCC AR6 对地球气候系统中反馈机制的新认识[J].大气科学学报,44(6):805-817. Zhao S Y,Kong L H,Zhang H,et al.,2021.New understandings of the feedback mechanisms in the earth climate sys-tem in IPCC AR6[J].Trans Atmos Sci,44(6):805-817.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210920001.(in Chinese).

周波涛,2021.全球气候变暖:浅谈从 AR5 到 AR6 的认知进展[J].大气科学学报,44(5):667-671. Zhou B T,2021.Global warming:scientific progress from AR5 to AR6[J].Trans Atmos Sci,44(5):667-671.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210815009.(in Chinese).

· ARTICLE ·

# Natural emissions of short-lived climate forcers and their climate feedbacks:IPCC AR6 interpretation

ZHANG Hua[1],YANG Zhenjiang[2],SU Hongjuan[1],ZHANG Danyuting[2],AN Qi[3,4],YUAN Chang[5],LI Shuai[6],HE Jingyi[1],XIE Bing[7],ZHAO Shuyun[5],LI Ke[2]

[1] *State Key Laboratory of Severe Weather,Chinese Academy of Meteorological Sciences,Beijing* 100081,*China*;

[2] *School of Environmental Science and Engineering,Nanjing University of Information Science & Technology,Nanjing* 210044,*China*;

[3] *Institute of Urban Meteorology,China Meteorological Administration,Beijing* 100089,*China*;

[4] *Karamay Meteorological Bureau of Xinjiang,Karamay* 834000,*China*;

[5] *Department of Atmospheric Science,School of Environmental Studies,China University of Geosciences,Wuhan* 430078,*China*;

[6] *College of Environmental Science and Engineering,Donghua University,Shanghai* 201620,*China*;

[7] *Laboratory for Climate Research,National Climate Center,Beijing* 100081,*China*

**Abstract** Short-lived Climate Forcers (SLCFs) have a significant impact on air pollution and climate change. The Sixth Assessment Report (AR6) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) pays a special attention on SLCFs,which includes an assessment of natural emissions of SLCFs in addition to the anthropogenic SLCFs.The understanding of natural emissions of SLCFs and their climate feedbacks would be more important in the future with the reduction of anthropogenic SLCFs under climate warming.In this paper,the latest findings from IPCC AR6 are introduced in terms of natural emissions of SLCFs,changes in emissions under historical and future climate scenarios,and their climate feedbacks.Under climate warming,future emissions of lighting $NO_x$,biogenic VOCs,and biomass burning will likely increase,and the sensitivity in emissions of soil $NO_x$,dust,sea salt,and dimethyl sulfide (DMS) to climate change is uncertain.Meanwhile,due to changes in emissions,atmospheric burden,or lifetime of SLCFs in response to climate warming,the overall effect will likely result in a negative feedback of −0.20 W/m$^2$/℃ (−0.41~+0.01 W/m$^2$/℃),which may slightly mitigate climate warming.

**Keywords** short-lived climate forcers;climate change;natural emissions;climate feedbacks;radiative forcing

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20220921001

(责任编辑:刘菲)