

空气污染-气候相互作用:IPCC AR6 的结论解读

廖宏*,高瑜成,陈东林,代慧斌,杜楠,方力,亢灵,钱静,秦卓凡,王叶,谢佩芙,杨豪,张丹瑜婷
南京信息工程大学 江苏省大气环境监测与污染控制高新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,江苏南京 210044

* 联系人, E-mail: hongliao@nuist.edu.cn

2021-08-23 收稿, 2021-09-01 接受

国家重点研发计划项目(2019YFA0606804)

摘要 本文解读最近发布的政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次气候变化评估报告(Sixth Assessment Report, AR6)关于空气污染-气候相互作用的主要新结论。在大气污染物的气候效应方面, AR6 估算了大气污染物或其前体物排放变化导致的有效辐射强迫值(Effective Radiative Forcing, ERF), 对评估大气污染治理可能产生的气候效应具有启示性意义。AR6 也估算出1750—2019年间人为强迫导致的全球平均地表温度(Global mean Surface Air Temperature, GSAT)变化为1.29(0.99~1.65) °C, 其中, 均匀混合温室气体、臭氧、气溶胶导致的温度变化分别为1.58(1.17~2.17) °C、0.23(0.11~0.39) °C、-0.50(-0.22~-0.96) °C。气溶胶历史变化的气候效应中, 起决定性作用的是由SO₂排放变化通过气溶胶-云相互作用所产生的ERF(高信度), 从而部分抵消了人为排放温室气体所引起的变暖(高信度)。在气候变化影响大气污染物方面, AR6 首次评估获得了地表臭氧浓度对温度的敏感性, 在偏远地区为-0.2~-2 nL·L⁻¹·°C⁻¹、在污染区为0.2~2 nL·L⁻¹·°C⁻¹。在大多数陆地区域, 关于气候变化是增加还是减少PM_{2.5}, 目前模式结果结论的一致性较低。

关键词

大气污染;
臭氧;
PM_{2.5};
气候变化

大气污染物-气候系统相互作用同时涉及到大气环境、天气、气候变化这几个关系到国计民生和社会经济协调发展的重要研究领域。大气中短寿命的化学物质臭氧和气溶胶(大气中液态或固态的颗粒物)对人体健康和生态系统有着直接的危害, 是当前空气污染治理的主要对象(UNEP and WMO, 2011)。同时这些化学物质还是仅次于长寿命温室气体(二氧化碳、氧化亚氮等)影响气候变化的重要大气成分。对流层臭氧是温室气体, 引起气候增暖。气溶胶吸收、散射短波和长波辐射(气溶胶-辐射相互作用), 还作为云凝结核影响云的辐射特性、云的生命史及降水特性(气溶胶-云相互作用), 从而导致气候变化。

大气污染物最主要的成分包括氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)、二氧化硫(SO₂)、PM_{2.5}、PM₁₀和臭氧(O₃)。臭氧是人为排放的NO_x、CO、非甲烷挥发性有机物(NMVOCS)以及植被排放的挥发性有机物(BVOCS)在太阳光照射下化学反应形成的。大气中主要的气溶胶成分包括硫酸盐、硝酸盐、铵盐、一次和二次有机碳、黑碳、沙尘及海盐。大气污染物来源于人为活动(能源、交通运输、工业生产、居家民用、农业活动、生物质燃烧等)和自然过程(野火、植被排放BVOCS、土壤和闪电排放NO_x、沙漠排放沙尘气溶胶、海洋排放海盐气溶胶等)。大气污染物的化学、物理和光学特性除了受到排放的影响而外, 还受到气候变化的影响。气候变化引

引用格式: 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).

起大多数自然源排放以及一些人为排放(例如农业排放)的排放量发生变化,从而导致气候反馈(图1)。气候变化(例如边界层厚度、风速风向、温度、湿度和降雨等的变化)还会影响大气化学过程(例如化学反应速率、污染物的传输和沉降),从而影响大气成分导致气候反馈。

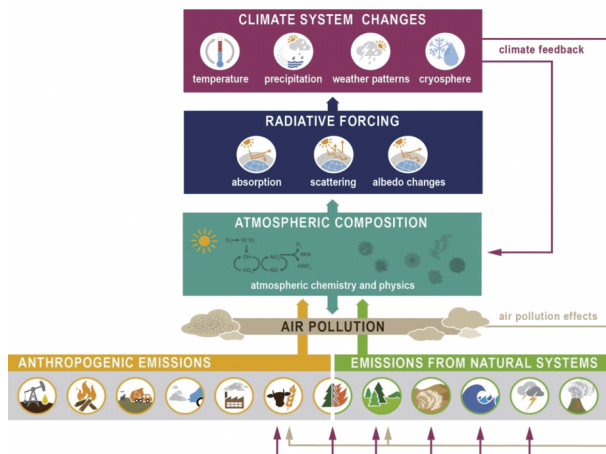


图1 空气污染与气候系统的相互作用(来源:IPCC AR6 WGI 报告,图 6.1)

Fig. 1 Interactions between air pollution and climate system (Source:IPCC AR6 WGI, Figure 6.1)

本文解读最新发布的政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次气候变化评估报告关于空气污染-气候相互作用的主要结论。

1 大气污染物对气候的影响

1.1 大气污染物或其前体物的有效辐射强迫值(ERF)

图2给出基于排放变化估算的1750—2019年,

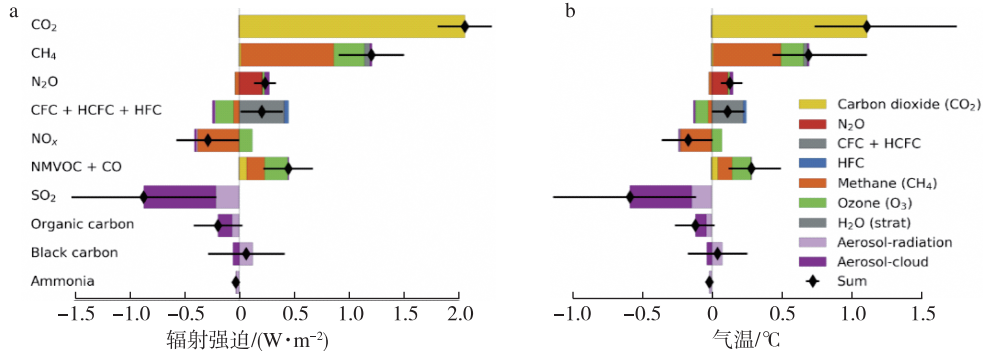


图2 1750—2019年各种化学物质排放变化产生的有效辐射强迫(a;单位: $W \cdot m^{-2}$)以及相应对全球平均地表气温的影响(b;单位: $^{\circ}C$)(来源:IPCC AR6 报告,图 6.12)

Fig.2 (a)Emission-based estimates of effective radiative forcing (ERF;unit: $W \cdot m^{-2}$) and (b) the corresponding changes in global mean surface air temperature (GSAT;unit: $^{\circ}C$) over 1750—2019 by different chemical species based on CMIP6 models (Source:IPCC AR6, Figure 6.12)

各种化学物质产生的有效辐射强迫(Effective Radiative Forcing, ERF)以及相应对全球平均地表气温的影响。甲烷(CH₄)、NO_x和SO₂的排放产生的ERF较大,而OC、BC、NH₃产生的ERF较小。

甲烷本身是温室气体,也是地表臭氧的重要前体物导致臭氧生成。考虑到这两种因素,基于甲烷排放计算的ERF远高于基于其浓度变化计算的ERF。基于排放变化的估计值为 $1.21(0.90 \sim 1.51) W \cdot m^{-2}$,而基于浓度变化的估计值则为 $0.54 W \cdot m^{-2}$ 。NO_x增加对流层臭氧生成导致ERF正值,也通过增加OH浓度减少甲烷寿命导致ERF负值。尽管参加气溶胶和化学多模式比较计划(AerChemMIP)的模式中只有3个模式能模拟硝酸盐气溶胶,但模式结果一致显示NO_x会导致硝酸盐气溶胶的生成产生较小的ERF负贡献。AR6人为NO_x排放变化引起的净ERF的最佳估计值为 $-0.29(-0.57 \sim 0.0) W \cdot m^{-2}$,量级略大于AR5的估计值($-0.15(-0.34 \sim +0.02) W \cdot m^{-2}$),但两次评估具有相似的不确定性。

SO₂的人为排放导致硫酸盐气溶胶的生成,通过其气溶胶-辐射(ERF_{ari})和气溶胶-云相互作用(ERF_{aci})导致ERF负值。基于排放的ERF_{aci}以前没有考虑在AR5中,现在包括在AR6的计算内。因此,尽管自2011年以来硫酸盐气溶胶浓度下降,但AR6估算的ERF比AR5有更大的负值。1750年至今SO₂排放变化导致的ERF估算为 $-0.90(-1.56 \sim -0.24) W \cdot m^{-2}$,其中 $-0.22 W \cdot m^{-2}$ 来自气溶胶-辐射相互作用, $-0.68 W \cdot m^{-2}$ 来自气溶胶-云相互作用。NH₃排放导致硝酸铵气溶胶的生成,估计的ERF为 $-0.03 W \cdot m^{-2}$ 。

关于碳类气溶胶,AR6估算的BC ERF比AR5估算的小,现在估算为 $0.063(-0.28\sim 0.42)W\cdot m^{-2}$,不确定性也包括负值。气溶胶-辐射相互作用产生的BC ERFari正值的很大一部分被其导致的云变化和水汽变化引起的BC ERFaci负值抵消,因此导致了BC较小的净ERF正值。BC ERF的不确定性源于不同模式大气调整量级和符号的变化有差异,并且与模式处理影响BC的不同过程(例如老化、混合)及其与云和冰冻圈的相互作用的差异有关(Thornhill et al.,2021)。基于排放估算的有机碳气溶胶 ERF 为 $-0.20(-0.41\sim -0.03)W\cdot m^{-2}$,与AR5相比绝对值变小,归因于新估算考虑了OC对辐射有更强的吸收。

1.2 大气污染物导致的气候响应

排放的化学物质对全球平均地表气温(GSAT)的影响基本取决于它们对ERF的贡献(图2)。在全球范围内,从工业化前至今,气溶胶ERF为负值,人为排放的气溶胶导致了降温。多模式结果表明,与BC或OC相比,硫酸盐气溶胶的前体物SO₂的排放变化是导致近地表气温降低的主要驱动因素,尽管在某些地区,BC强迫起着关键作用(Baker et al.,2015;Samset et al.,2016;Stjern et al.,2017;Zanis et al.,2020)。此外,气溶胶驱动的降温已经导致了可检测的大规模水循环变化,这是AR6具有很高置信度的结论。

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(高置信度)。CMIP6多模式集合平均结果(图3)显示,从1850年到最近

(1995—2014年),随着气溶胶及其前体物排放的增加,全球几乎所有地区都在变冷,这与CMIP5模式的结果一致。集合平均的全球平均地表温度下降(0.66 ± 0.51)°C(北半球下降(0.97 ± 0.54)°C,南半球下降(0.34 ± 0.2)°C)。纬向平均温度的响应在所有纬度都是负值(高置信度),北极的温度下降最大,平均约2.7°C。在北极的温度响应是降温,而当地的ERF为正值,这与先前的研究一致。因此,温度对气溶胶的响应比对均匀混合的温室气体的响应更具有不对称性并且在所有纬度都为负值(高置信度)。

AR6定量给出了大气污染物对温度的贡献。在1750—2019年间,人为强迫导致的GSAT变化为 $1.29(0.99\sim 1.65)$ °C,其中,均匀混合温室气体导致的增温为 $1.58(1.17\sim 2.17)$ °C,O₃变化导致的增温为 $0.23(0.11\sim 0.39)$ °C,气溶胶导致的冷却为 $-0.50(-0.96\sim -0.22)$ °C。

2 气候变化对空气质量的影响

气候变化可通过影响物理、化学和生物过程而对大气污染物产生影响。气象条件变化改变大气污染物的传输(通过大气阻塞事件的发生和持续时间、大气边界层的通风条件、平流层-对流层交换(STE)等方式)、二次污染物的化学反应速率以及降水对气溶胶的湿清除,对大气污染物浓度有很大的影响(Hou et al.,2018)。气候变化也影响动态植被以及相应的BVOCs排放。

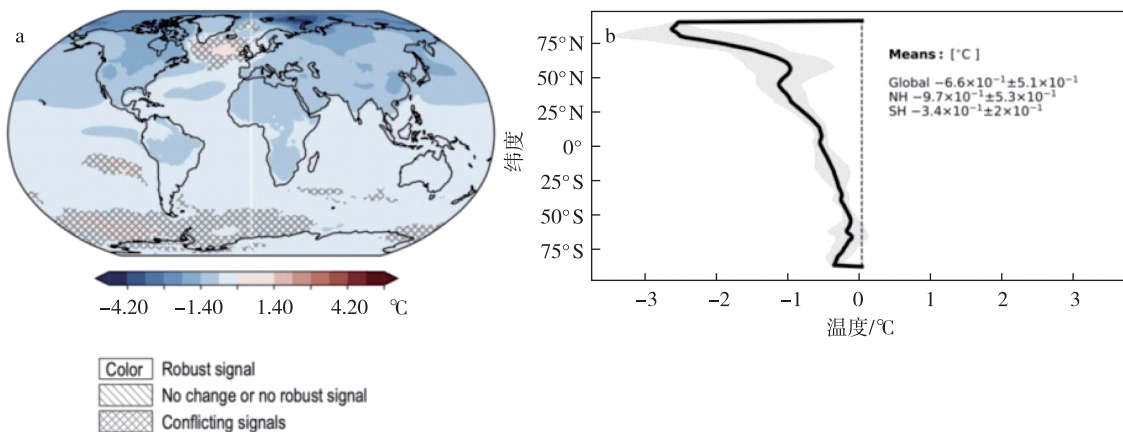


图3 从1850年至最近(1995—2014年),由于气溶胶变化引起的多模式集合平均地表气温(单位:°C)响应,分别为年平均地表气温响应的空间分布(a)及纬向平均响应(b)(来源:IPCC AR6报告,图6.13)

Fig.3 The multi model average surface temperature (unit:°C) response caused by aerosol change from 1850 to recent (1995—2014).(a)The spatial pattern of the responses in annual mean surface air temperature, and (b) the zonal mean of the responses(Source:IPCC AR6,Figure 6.13)

2.1 气候变化对地表 O₃ 污染的影响

地表臭氧对气候的响应是复杂的。一些过程会增加地表臭氧浓度,例如 STE 增强和平流层臭氧恢复 (Morgenstern et al., 2017; Meul et al., 2018; Akritidis et al., 2019) 以及全球变暖背景下土壤中 NO_x 排放的增加 (Wu et al., 2008; Romer et al., 2018) 都会导致地表臭氧增加 1~2 nL · L⁻¹。其他过程,特别是臭氧沉降或与自然源排放有关的过程 (例如野火) 都将影响地表臭氧浓度甚至是臭氧污染事件,但其影响很难单独量化。自 AR5 以来,一些全球或区域模式模拟了气候变化对地表臭氧的净影响,但因为各种模式在自然排放、化学机制和物理过程的表达方面具有不同的复杂性,很难对臭氧变化进行系统且定量的比较,也需要进行长时间模拟,才能不受年际变化信号的干扰。模式的分辨率也很重要。与粗分辨率全球模式相比,高分辨率 (区域和城市尺度) 模式中气候变化对污染区域臭氧的影响幅度可能有所不同,主要原因是许多关键过程都依赖于分辨率 (例如局地排放、对 VOC 限制区或 NO_x 限制区的表达等)。

参与 CMIP6 的地球系统模式中,四个模式的集合平均结果显示,由于全球变暖水汽增加导致臭氧的化学清除增大,全球地表臭氧的年均浓度在升温 1.5~2.5 °C 时下降大约 1.2~2.3 nL · L⁻¹ (图 4)。这些减少是由海洋上空的臭氧减少 (特别是在热带地区,减少 1~5 nL · L⁻¹) 和陆地上比较清洁地区的臭氧减少主导的。在这些偏远地区,年均地表臭氧浓度对气候变暖的敏感性因地而异,在 -0.2 ~ -2 nL · L⁻¹ · °C⁻¹ 的范围。在北美、欧洲和东亚等臭氧浓度较高的地区,AR5 及其之后的模式结果均显示在未来气候变暖的情况下,夏季地表臭氧浓度将普遍增加 (单纯气候变化对臭氧的影响) (Fu and Tian, 2019)。气候变化提高了污染地区排放的前体物生成近地表臭氧的效率 (Schnell et al., 2016), 因此这种影响的量级将取决于研究中考虑的排放量 (现在或未来、减排与否) (Colette et al., 2015; Fiore et al., 2015)。

CMIP6 四个模式的集合平均结果显示,在人为或自然源排放较大的区域,地表臭氧浓度基本上是随温度增加而增加,地表臭氧浓度对温度的敏感性范围是 0.2~2 nL · L⁻¹ · °C⁻¹ (图 5)。CMIP6 模式在东南

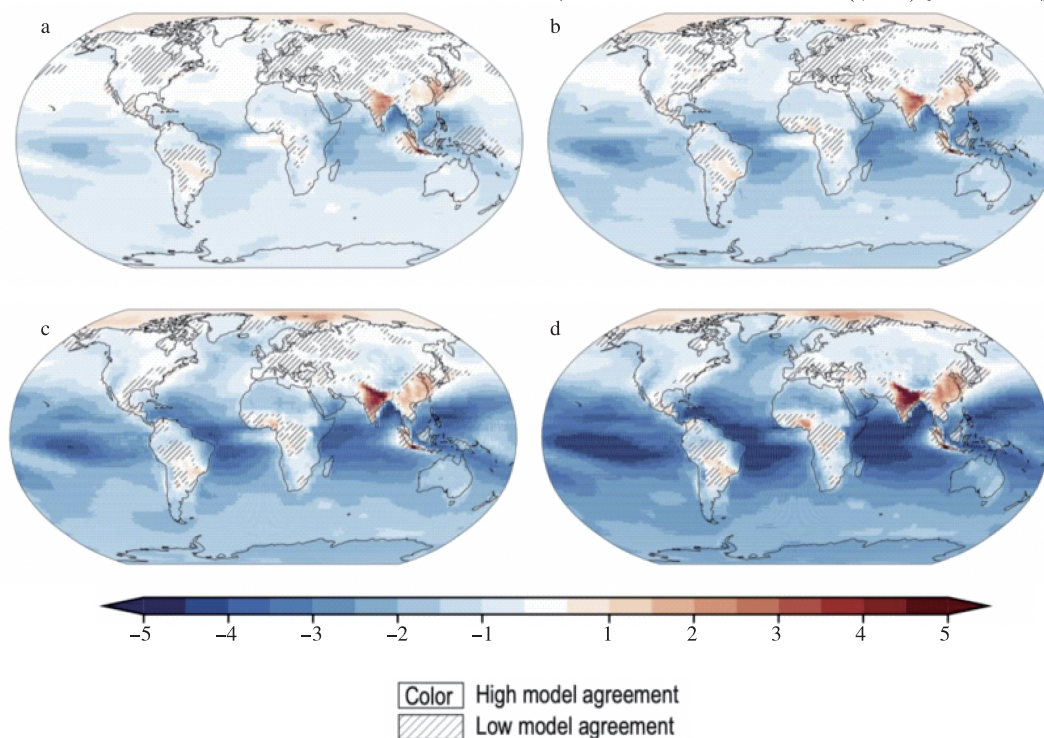


图 4 全球平均地表气温度上升 1.0 (a)、1.5 (b)、2.0 (c) 和 2.5 (d) °C 情况下,多模式模拟的地表 O₃ 年均浓度变化 (单位:nL · L⁻¹) (来源:IPCC AR6 报告,图 6.14)

Fig.4 Average annual concentration change of surface O₃ (nL · L⁻¹) under different warming levels. The change shown in the figure is when the global average surface temperature rises (a) 1.0, (b) 1.5, (c) 2.0 and (d) 2.5 °C (Source: IPCC AR6, Figure 6.14)

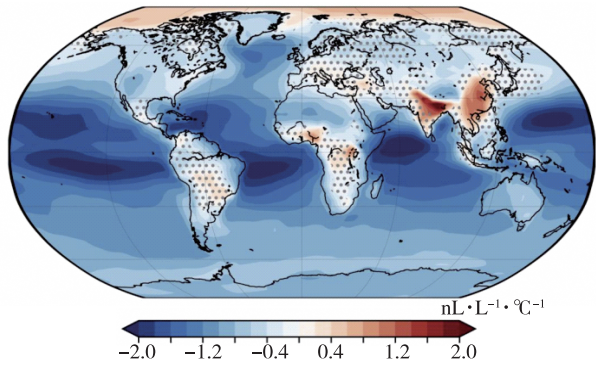


图5 2015—2100年CMIP6集合平均(GFDL-ESM4、GISS-E2-1-G、MRI-ESM2-0、UKESM1-0-LL)的年均地表臭氧浓度变化(ssp370SST-ssp370pdSST)与年均地表气温变化(ssp370SST-ssp370pdSST)(单位: $\text{nL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)间的回归系数的空间分布。没有圆点的区域表示回归系数具有统计意义(95%的显著水平),并且在四个模式中至少有三个模式的变化符号一致。ssp370SST为使用未来情景SSP3-7.0的试验,ssp370pdSST为除了海表温度(SSTs)和海冰浓度为2005—2014年气候态外,其余设置与ssp370SST试验一致(来源:IPCC AR6报告,图6.SM.1)

Fig.5 Spatial pattern of the regression coefficient of annual surface ozone change (ssp370SST-ssp370pdSST) over annual surface temperature change (ssp370SST-ssp370pdSST) ($\text{nL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$) during the time period from 2015 to 2100, for the CMIP6 ensemble average (GFDL-ESM4, GISS-E2-1-G, MRI-ESM2-0, UKESM1-0-LL). Regions without dots indicate that modelled regression coefficient are statistically significant (at the 95% significance level), and agree on the sign for at least three out of four models. ssp370SST is future simulation with SSP3-7.0 emissions, while ssp370pdSST is the same as ssp370SST except that sea surface temperatures (SSTs) and sea ice concentrations are take from climatology of 2005—2014 (Source: IPCC AR6, Figure 6.SM.1)

亚、印度以及非洲和南美洲的部分地区表现出了一致性。在欧洲和美国的污染区域这个敏感性是不清晰的,因为较低的人为排放导致了近地面臭氧对气候变化的敏感性非常低($-0.5 \sim 0.5 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)。

总体而言,气候变暖会减少较为清洁地区的地表臭氧,因为更多的水蒸气会加速臭氧化学清除(高信度)。在人为和/或自然臭氧前体物排放量较高的区域,有普遍证据表明气候变化将增加地表 O_3 ,且浓度增加的量级会随着变暖水平而增大(敏感性 $0.2 \sim 2 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)(中等信度至高信度)。

然而,目前对地表臭氧受气候变暖影响的具体过程的理解还存在不确定性。目前对气候变化-生物圈相互作用(自然 CH_4 排放、BVOCs排放和臭氧沉降)和闪电 NO_x 排放对地表臭氧的影响程度的研究结果置信度较低。

2.2 气候变化对颗粒物(PM)污染的影响

全球变暖导致全球平均PM浓度水平略有增加(在RCP8.5情景下到2100年PM增加约为 $0.21 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,主要是硫酸盐和有机气溶胶的变化)或略有下降(在RCP2.6情景下为 $-0.06 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)(Westervelt et al., 2016; Xu and Lamarque, 2018)。模式结果也显示,尽管在未来全球降水总量预估会增加,但雨带的变化会导致气溶胶湿清除减少,整个21世纪的气溶胶大气总量和地表PM浓度都会增加。CMIP6三个模式的结果表明,对于大多数陆地区域,气候变化是增加还是减少 $\text{PM}_{2.5}$,模式结论的一致性较低(图6)。

由于PM在大气中的存留时间约为几天,目前大多数关于未来PM浓度水平的研究均关注区域特征,主要关注欧洲(Megaritis et al., 2013; Lacresonnière et al., 2016, 2017; Lemaire et al., 2016; Cholakian et al., 2019)、美国(Penrod et al., 2014; Fiore et al., 2015; Gonzalez-Abraham et al., 2015; Shen et al., 2017; He et al., 2018; Nolte et al., 2018)、南亚和东亚(Jiang et al., 2013; Nguyen et al., 2019)以及印度(Pommier et al., 2018)。世界上其他地区还没有此类研究结论。

未来气候变化导致的颗粒物化学组成的改变也是颗粒物对人类健康和环境影响的一个重要议题,但这方面的文献中只有少量数据可用,目前尚无定论(Im et al., 2012; Jiang et al., 2013; Megaritis et al., 2013; Gonzalez-Abraham et al., 2015; Gao et al., 2017; He et al., 2018; Cholakian et al., 2019)。

总体而言,气候变化对全球大气颗粒物总量存在或正或负的较小量级的影响,是AR6中等信度的结论。

2.3 气候变化对极端污染的影响

极端空气污染是指空气污染物的浓度高于某一给定阈值(高浓度或高百分位数)。污染物峰值浓度对气象条件的敏感性可能不同于中值或平均值的敏感性(Porter et al., 2015)。气象条件,如热浪、逆温和大气静稳事件有利于极端污染事件形成,而他们都受到气候变化的影响(Fiore et al., 2015)。研究气候变化和极端污染事件之间关系的大量文献主

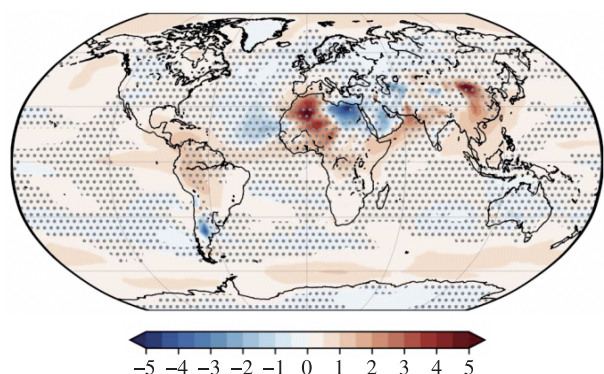


图6 2015—2100年CMIP6集合平均(GFDL-ESM4、GISS-E2-1-G、MRI-ESM2-0)的年均地表 $PM_{2.5}$ 浓度变化(ssp370SST-ssp370pdSST)与年均地表温度变化(ssp370SST-ssp370pdSST)(单位: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{C}^{-1}$)间的回归系数的空间分布。没有圆点的区域表示回归系数具有统计意义(95%显著性水平),并且三个模式中至少有两个在符号上一致。ssp370SST为使用未来情景SSP3-7.0的试验,ssp370pdSST为除了海表温度(SSTs)和海冰浓度为2005—2014年气候态外,其余设置与ssp370SST试验一致(来源:IPCC AR6报告,图6.SM.2)

Fig.6 Spatial pattern of the regression coefficient of annual surface $PM_{2.5}$ change (ssp370SST-ssp370pdSST) over annual surface temperature change (ssp370SST-ssp370pdSST) ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{C}^{-1}$) during the time period from 2015 to 2100, for the CMIP6 ensemble average (GFDL-ESM4, GISS-E2-1-G, MRI-ESM2-0). Regions without dots indicate that modelled regression coefficient are statistically significant (at the 95% significance level), and agree on the sign for at least three out of four models. ssp370SST is future simulation with SSP3-7.0 emissions, while ssp370pdSST is the same as ssp370SST except that sea surface temperatures (SSTs) and sea ice concentrations are taken from climatology of 2005—2014 (Source: IPCC AR6, Figure 6.SM.2)

要基于统计相关和回归分析,由于指标和方法不同很难进行定量比较。自然系统中的许多排放过程都对温度敏感,例如干燥条件下的野火,增加了极端空气污染的风险。

自AR5以来,已发表的研究提供了极端臭氧和极端PM污染事件与高温之间关联的更多证据,尤其是长期持久的热浪的频率因气候变暖而增加(Lelieveld et al., 2014; Porter et al., 2015; Hou and Wu, 2016; Schnell and Prather, 2017; Sun et al.,

2017)。热浪通常与晴空和静稳大气联系在一起,这使得极端污染事件与某一特定气象变量的归因变得复杂。在亚洲,研究显示未来冬季气象条件有利于更多的极端PM污染事件的发生(Cai et al., 2017; Zou et al., 2017)。已有研究表明,静稳天气与高浓度臭氧和高浓度 $PM_{2.5}$ 之间的关系跟研究的区域有关(Oswald et al., 2015; Sun et al., 2017; Kerr and Waugh, 2018; Schnell et al., 2018; Garrido-Perez et al., 2019)。

3 结论及未来研究展望

综上所述,AR6空气污染-气候相互作用的主要新结论包括:

1) 评估获得了 CH_4 、 NO_x 、NMVOCs+CO、 SO_2 、OC、BC、 NH_3 产生的ERF值。AR6估算的BC ERF比AR5估算的小,主要原因是气溶胶-辐射相互作用产生的正ERF的很大一部分被其气溶胶-云相互作用产生的负ERF抵消。 CH_4 和NMVOCs+CO的ERF均为正值,因此对他们的减排是空气质量和气候双赢的减排措施。

2) 大气污染物在气候变化中起着非常重要的作用。AR6估算出1750—2019年间人为强迫导致的全球平均地表温度(GSAT)变化为 $1.29(0.99\sim 1.65)\text{C}$,其中,均匀混合温室气体、臭氧、气溶胶导致的温度变化分别为 $1.58(1.17\sim 2.17)\text{C}$ 、 $0.23(0.11\sim 0.39)\text{C}$ 、 $-0.50(-0.96\sim -0.22)\text{C}$ 。

3) AR6首次评估获得了地表臭氧浓度对温度的敏感性,在偏远地区为 $-2\sim -0.2\text{nL}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ 、在污染区为 $0.2\sim 2\text{nL}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ 。在大多数陆地区域,关于气候变化是增加还是减少 $PM_{2.5}$,目前模式结果结论的一致性较低。气候变化导致的 $PM_{2.5}$ 化学组成的改变也是颗粒物对人类健康和环境影响的重要议题,但目前这方面的研究太少,在未来可以投入更多的研究。

AR6虽有上述重要新进展,但评估结果还存在一定的不确定性。大气污染物的ERF和气候效应的定量表达,不仅依赖于模式对大气污染物当前浓度和辐射效应的表达,也非常依赖于模式对工业化以前污染物浓度和分布的准确描述。然而,因缺乏工业化前大气污染物的观测,尚不能较好地验证模式模拟的工业化前大气污染物浓度水平。此外,由于世界各地特别是南半球缺乏观测网络,各类气溶胶的近期变化趋势分析具有不确定性。

对城市一级空气污染变化的评估需要使用高分

分辨率模式,从而能更准确地考虑化学、特定城市结构、当地气象以及排放和人口暴露的时间和空间变化的非线性。AR6关于气候变化对大气污染物影响的评估结论,主要依赖于时空分辨率较粗的地球系统模式的模拟结果,模式对于空气质量的表达有一定的局限性。

自AR5以来,地球系统模式的复杂性增加,包

括了更多的生物地球化学过程,这对量化自然源排放、大气化学、气候变化以及他们之间的相互影响都是非常必要的。然而,由于涉及多个复杂的过程,评估非CO₂生物地球化学反馈仍然具有挑战性,需要更多的观测数据和更多研究,对涉及的过程和机制有更好的科学理解。

参考文献(References)

- Akritidis D, Pozzer A, Zanis P, 2019. On the impact of future climate change on tropopause folds and tropospheric ozone [J]. *Atmos Chem Phys*, 19(22): 14387-14401. doi: 10.5194/acp-19-14387-2019.
- Baker L H, Collins W J, Oliv   D J L, et al., 2015. Climate responses to anthropogenic emissions of short-lived climate pollutants [J]. *Atmos Chem Phys*, 15(14): 8201-8216. doi: 10.5194/acp-15-8201-2015.
- Cai W J, Li K, Liao H, et al., 2017. Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change [J]. *Nat Clim Change*, 7(4): 257-262. doi: 10.1038/nclimate3249.
- Cholakian A, Colette A, Coll I, et al., 2019. Future climatic drivers and their effect on PM₁₀ components in Europe and the Mediterranean Sea [J]. *Atmos Chem Phys*, 19(7): 4459-4484. doi: 10.5194/acp-19-4459-2019.
- Colette A, Andersson C, Baklanov A, et al., 2015. Is the ozone climate penalty robust in Europe? [J]. *Environ Res Lett*, 10(8): 084015. doi: 10.1088/1748-9326/10/8/084015.
- Fiore A M, Naik V, Leibensperger E M, 2015. Air quality and climate connections [J]. *J Air Waste Manag Assoc*, 65(6): 645-685. doi: 10.1080/10962247.2015.1040526.
- Fu T M, Tian H, 2019. Climate change penalty to ozone air quality: review of current understandings and knowledge gaps [J]. *Curr Pollut Rep*, 5(3): 159-171. doi: 10.1007/s40726-019-00115-6.
- Gao M, Han Z W, Liu Z R, et al., 2017. Air quality and climate change, topic 3 of the model Inter-Comparison study for Asia phase III (mics-asia III), part I: overview and model evaluation [J]. *Atmos Chem Phys*, 1-59. doi: 10.5194/acp-2017-731.
- Garrido-Perez J M, Ord  nez C, Garc  a-Herrera R, et al., 2019. The differing impact of air stagnation on summer ozone across Europe [J]. *Atmos Environ*, 219: 117062. doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117062.
- Gonzalez-Abraham R, Chung S H, Avise J, et al., 2015. The effects of global change upon United States air quality [J]. *Atmos Chem Phys*, 15(21): 12645-12665. doi: 10.5194/acp-15-12645-2015.
- He H, Liang X Z, Wuebbles D J, 2018. Effects of emissions change, climate change and long-range transport on regional modeling of future US particulate matter pollution and speciation [J]. *Atmos Environ*, 179: 166-176. doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.02.020.
- Hou P, Wu S L, 2016. Long-term changes in extreme air pollution meteorology and the implications for air quality [J]. *Sci Rep*, 6: 23792. doi: 10.1038/srep23792.
- Hou P, Wu S L, McCarty J L, et al., 2018. Sensitivity of atmospheric aerosol scavenging to precipitation intensity and frequency in the context of global climate change [J]. *Atmos Chem Phys*, 18(11): 8173-8182. doi: 10.5194/acp-18-8173-2018.
- Im U, Markakis K, Ko  ak M, et al., 2012. Summertime aerosol chemical composition in the Eastern Mediterranean and its sensitivity to temperature [J]. *Atmos Environ*, 50: 164-173. doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.12.044.
- Jiang H, Liao H, Pye H O T, et al., 2013. Projected effect of 2000-2050 changes in climate and emissions on aerosol levels in China and associated transboundary transport [J]. *Atmos Chem Phys*, 13(16): 7937-7960. doi: 10.5194/acp-13-7937-2013.
- Kerr G H, Waugh D W, 2018. Connections between summer air pollution and stagnation [J]. *Environ Res Lett*, 13(8): 084001. doi: 10.1088/1748-9326/aad2e2.
- Lacressonni  re G, Foret G, Beekmann M, et al., 2016. Impacts of regional climate change on air quality projections and associated uncertainties [J]. *Clim Change*, 136(2): 309-324. doi: 10.1007/s10584-016-1619-z.
- Lacressonni  re G, Watson L, Gauss M, et al., 2017. Particulate matter air pollution in Europe in a +2   C warming world [J]. *Atmos Environ*, 154: 129-140. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.01.037.
- Lelieveld J, Hadjinicolaou P, Kostopoulou E, et al., 2014. Model projected heat extremes and air pollution in the eastern Mediterranean and Middle East in the twenty-first century [J]. *Reg Environ Change*, 14(5): 1937-1949. doi: 10.1007/s10113-013-0444-4.
- Lemaire V E P, Colette A, Menut L, 2016. Using statistical models to explore ensemble uncertainty in climate impact studies: the example of air pollution in Europe [J]. *Atmos Chem Phys*, 16(4): 2559-2574. doi: 10.5194/acp-16-2559-2016.
- Megaritis A G, Fountoukis C, Charalampidis P E, et al., 2013. Response of fine particulate matter concentrations to changes of emissions and temperature

- in Europe[J]. *Atmos Chem Phys*, 13(6):3423-3443.doi:10.5194/acp-13-3423-2013.
- Meul S, Langematz U, Kröger P, et al., 2018. Future changes in the stratosphere-to-troposphere ozone mass flux and the contribution from climate change and ozone recovery[J]. *Atmos Chem Phys*, 18(10):7721-7738.doi:10.5194/acp-18-7721-2018.
- Morgenstern O, Hegglin M, Rozanov E, et al., 2017. Review of the global models used within phase 1 of the Chemistry-Climate Model Initiative (CCMI) [J]. *Geosci Model Dev*, 10(2):639-671.doi:10.5194/gmd-10-639-2017.
- Nguyen G T H, Shimadera H, Uranishi K, et al., 2019. Numerical assessment of PM_{2.5} and O₃ air quality in Continental Southeast Asia: impacts of potential future climate change[J]. *Atmos Environ*, 215:116901.doi:10.1016/j.atmosenv.2019.116901.
- Nolte C G, Spero T L, Bowden J H, et al., 2018. The potential effects of climate change on air quality across the conterminous US at 2030 under three Representative Concentration Pathways[J]. *Atmos Chem Phys*, 18(20):15471-15489.doi:10.5194/acp-18-15471-2018.
- Oswald E M, Dupigny-Giroux L A, Leibensperger E M, et al., 2015. Climate controls on air quality in the Northeastern US: an examination of summertime ozone statistics during 1993—2012[J]. *Atmos Environ*, 112:278-288.doi:10.1016/j.atmosenv.2015.04.019.
- Penrod A, Zhang Y, Wang K, et al., 2014. Impacts of future climate and emission changes on US air quality [J]. *Atmos Environ*, 89:533-547.doi:10.1016/j.atmosenv.2014.01.001.
- Pommier M, Fagerli H, Gauss M, et al., 2018. Impact of regional climate change and future emission scenarios on surface O₃ and PM_{2.5} over India[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(1):103-127.doi:10.5194/acp-18-103-2018.
- Porter W C, Heald C L, Cooley D, et al., 2015. Investigating the observed sensitivities of air-quality extremes to meteorological drivers via quantile regression[J]. *Atmos Chem Phys*, 15(18):10349-10366.doi:10.5194/acp-15-10349-2015.
- Romer P S, Duffey K C, Wooldridge P J, et al., 2018. Effects of temperature-dependent NO_x emissions on continental ozone production [J]. *Atmos Chem Phys*, 18(4):2601-2614.doi:10.5194/acp-18-2601-2018.
- Samset B H, Myhre G, Forster P M, et al., 2016. Fast and slow precipitation responses to individual climate forcings: a PDRMIP multimodel study [J]. *Geophys Res Lett*, 43(6):2782-2791.doi:10.1002/2016GL068064.
- Schnell J L, Prather M J, 2017. Co-occurrence of extremes in surface ozone, particulate matter, and temperature over eastern North America [J]. *PNAS*, 114(11):2854-2859.doi:10.1073/pnas.1614453114.
- Schnell J L, Prather M J, Josse B, et al., 2016. Effect of climate change on surface ozone over North America, Europe, and East Asia [J]. *Geophys Res Lett*, 43(7):3509-3518.doi:10.1002/2016GL068060.
- Schnell J L, Naik V, Horowitz L W, et al., 2018. Exploring the relationship between surface PM_{2.5} and meteorology in Northern India [J]. *Atmos Chem Phys*, 18(14):10157-10175.doi:10.5194/acp-18-10157-2018.
- Shen L, Mickley L J, Murray L T, 2017. Influence of 2000—2050 climate change on particulate matter in the United States: results from a new statistical model [J]. *Atmos Chem Phys*, 17(6):4355-4367.doi:10.5194/acp-17-4355-2017.
- Stjern C W, Samset B H, Myhre G, et al., 2017. Rapid adjustments cause weak surface temperature response to increased black carbon concentrations [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 122(21):11462-11481.doi:10.1002/2017JD027326.
- Sun W X, Hess P, Liu C J, 2017. The impact of meteorological persistence on the distribution and extremes of ozone [J]. *Geophys Res Lett*, 44(3):1545-1553.doi:10.1002/2016GL071731.
- Thornhill G D, Collins W J, Kramer R J, et al., 2021. Effective radiative forcing from emissions of reactive gases and aerosols—a multi-model comparison [J]. *Atmos Chem Phys*, 21(2):853-874.doi:10.5194/acp-21-853-2021.
- United Nations Environment Programme, World Meteorological Organization, 2011. Integrated assessment of black carbon and tropospheric ozone: summary for decision makers [R]. [2015-05-21]. http://www.unep.org/dewa/Portals/67/pdf/Black_Carbon.pdf.
- Westervelt D M, Horowitz L W, Naik V, et al., 2016. Quantifying PM_{2.5}-meteorology sensitivities in a global climate model [J]. *Atmos Environ*, 142:43-56.doi:10.1016/j.atmosenv.2016.07.040.
- Wu S L, Mickley L J, Jacob D J, et al., 2008. Effects of 2000—2050 changes in climate and emissions on global tropospheric ozone and the policy-relevant background surface ozone in the United States [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 113(D18):D18312.doi:10.1029/2007JD009639.
- Xu Y Y, Lamarque J F, 2018. Isolating the meteorological impact of 21st century GHG warming on the removal and atmospheric loading of anthropogenic fine particulate matter pollution at global scale [J]. *Earth's Future*, 6(3):428-440.doi:10.1002/2017EF000684.
- Zanis P, Akritidis D, Georgoulas A K, et al., 2020. Fast responses on pre-industrial climate from present-day aerosols in a CMIP6 multi-model study [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(14):8381-8404.doi:10.5194/acp-20-8381-2020.
- Zou Y F, Wang Y H, Zhang Y Z, et al., 2017. Arctic sea ice, Eurasia snow, and extreme winter haze in China [J]. *Sci Adv*, 3(3):e1602751.doi:10.1126/sciadv.1602751.

Assessment of air quality-climate interactions in IPCC AR6

LIAO Hong, GAO Yucheng, CHEN Donglin, DAI Huibin, DU Nan, FANG Li, KANG Ling, QIAN Jing, QIN Zhuofan, WANG Ye, XIE Peifu, YANG Hao, ZHANG Danyuting

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

This article introduces the new advances in air quality-climate interactions in the Sixth Assessment Report (AR6) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). AR6 presented emission-based estimates of the effective radiative forcing (ERF) of major air pollutants or their precursors, which have important implications for understanding the climatic effects of air pollution control measures. AR6 quantified the changes in global mean surface air temperature (GSAT) by anthropogenic emissions. Over 1750—2019, anthropogenic ERF was estimated to lead to change in GSAT by 1.29 (0.99—1.65) °C, in which changes in well-mixed greenhouse gases, O₃, and aerosols contributed 1.58 (1.17—2.17) °C, 0.23 (0.11—0.39) °C, -0.50 (-0.22—-0.96) °C, respectively. Changes in emissions of SO₂ since 1750 have made a dominant contribution to the effective radiation forcing (ERF) of aerosols through aerosol-cloud interactions (high confidence), which partially offset the warming caused by anthropogenic emissions of greenhouse gases (high confidence). AR6 assessed for the first time the sensitivity of surface ozone concentration to temperature, which is -0.2—-2 nL · L⁻¹ · °C⁻¹ in remote areas and 0.2—2 nL · L⁻¹ · °C⁻¹ in polluted regions. With respect to the impact of climate change on PM_{2.5}, model results show low consistency about whether climate change increases or decreases PM_{2.5}.

air pollution; ozone; PM_{2.5}; climate change

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210823011

(责任编辑:刘菲)