

全球气候变化背景下气溶胶和云相互作用研究愈发重要

自工业革命以来,在人类活动和自然因素的双重影响下,全球气候状况正经历着全球增温、海平面上升、极端气候事件频发等一些列变化,严重影响了人类的生产生活,全球气候变化受到世界的广泛关注。气溶胶和云相互作用因对天气系统的辐射平衡、水循环和能量循环有着重要影响而成为气候和天气预测中的重要组成部分,但因缺乏对其辐射过程、与大气环流作用等的深入了解,也使其成为了不确定性最大的部分,是未来全球气候变化研究领域的重点。

1 全球气候变化背景

2016年11月,世界气象组织(WMO)发布的《2011-2015年全球气候报告》和《2016年全球气候状况临时声明》指出,自20世纪80年代以来,人类活动导致的全球气候变化影响愈发显著,极端天气气候事件逐渐增加,风险日益提升,具体情况如下:受人类排放的温室气体和厄尔尼诺现象的影响,全球气温持续升高导致了2016年创记录的全球高温,高出1961年至1990年标准参照期平均温度约0.88℃;降水在全球的分布呈现显著不均匀性,例如美洲大部分地区、中亚部分地区经历了强降水,而欧洲中部和南部、东南亚部分地区、非洲南部经历了干旱;2011至2015年期间,北极9月份的平均海冰面积较1981至2010年平均面积减少了28%,北半球冰雪覆盖面积显著缩减,而南极海冰面积特别是冬季最大海冰面积却在大多数时间里高于1981至2010年平均水平;海洋变暖引发区域和全球海平面上升,过去60年里全球海平面上升高度的40%归因于海洋温度升高,1993年至今海平面高度年均上升3毫米;《美国气象学会公报》有研究表明,极端天气气候事件频发与人类活动造成的气候变化紧密相关,2017年入夏以来,高温、洪水、暴雪等极端天气侵袭了多个国家和地区,伴随而

至的灾害、事故严重影响经济和社会发展。

2 气溶胶和云相互作用

2.1 基本理论

气溶胶是地球大气中的一种微量成分,通过直接效应和间接效应影响气候。直接效应指气溶胶通过吸收和散射太阳辐射而直接影响天气系统的辐射平衡。间接效应指气溶胶可作为云凝结核(CCN)或冰核(IN)影响云含水量、云光学特性、云量和云寿命等进而间接影响气候,又可分为两类。第一类间接效应(Twomey效应):气溶胶数浓度增加导致云粒子的数浓度增加而半径减小,增加云体反照率(云中液态水含量不变时,与气溶胶的吸收特性和光学厚度有关)。第二类间接效应(Albrecht效应或云生命周期效应):人为气溶胶增加导致云粒子半径减小,进而抑制降水,改变云生命周期。此外气溶胶对云还有半直接效应,诸如烟尘、黑碳一类的气溶胶具有较强的吸收太阳辐射并重新向外释放热辐射的能力,可以加热大气和云团使云滴蒸发,起到减少云量,缩短云生命期,减小云体平均反照率的作用。反过来云可以通过降水清除大气中的气溶胶,进而影响气溶胶对云的作用^[1]。

气溶胶、云及其气候效应的研究长期以来受到国内外关注,但因其复杂性使得气溶胶对云宏观特性(云面积、云厚和液态水路径等)、微观特性(液滴和冰晶数浓度及大小分布)及降水作用的研究不够透彻,涉及动力、热力、云微物理过程和化学过程等方面的研究不够充分,且不同的云有不同的宏观特征(特别是层状云和对流云的特性和物理过程有很大的差别),因此气溶胶和云相互作用对气候系统的影响具有高度不确定性。

2.2 研究方法

观测分析。丰富、准确的观测资料是研究的基础,近年来地基、空基、天基

等多种观测手段的综合应用为研究云和气溶胶相互作用提供了有利条件^[2-3]。地基观测可利用的气溶胶观测网络有WMO的GAW、NASA的AERONET、法国的Photons、中国的CAeroNet等;新一代机载粒子测量系统(PMS)进行空中云探测已成为研究云微物理特征的重要空基观测手段,飞机观测能够获取地面仪器很难得到的云微观特征量(数浓度、液态水含量、云滴尺度分布等),进一步研究分析可得云中粒子谱的演变特点、降水转化率等,该资料还能结合雷达和卫星等遥测数据,为人工增雨、数值模式服务;以气象卫星为主的天基观测手段被国内外众多学者广泛使用,如利用CloudSat和MODIS探测云系垂直结构及定量研究云水含量和云辐射特征;CALIPSO可用于研究气溶胶对云形成和行程的影响,评价来自于其他气象卫星的气溶胶和云的资料;NOAA可获得从大尺度到中小尺度的对地高空间分辨率遥感数据;TRMM可穿透云层研究区域降水情况。

模式模拟。进一步探究云的微物理过程就需要通过云数值模式来掌握云发展过程中各要素的时空分布和演变规律,依据不同的微物理过程表达方式可分为两类:分档模式,根据各类粒子的尺度、质量分档模拟计算出各档粒子的生长演变过程,不受定谱函数限制,又十分接近粒子谱的自然图像;总体水模式,能反映出降水粒子的总体特征,发展初期因使用单参数方案仅能计算水成物的比质量,后期随着计算能力的提升陆续发展出双参数和三参数方案(水成物比质量,数浓度,水成物粒子分布谱形状)^[4-5]。

3 最新研究进展

云既是大陆和生态系统重要的淡水源头,也是气候系统能量平衡中重要的冷却因子。云的形成主要通过以气溶胶作为云凝结核(CCN),水汽积聚在上面

发生的异质核化过程。硫酸一直被认为是核化过程中的关键角色,但最新研究表明一种高氧化多功能有机分子(HOM compounds,由人为或自然过程排放到大气中的烃类、VOCs、臭氧等反应生成)被人忽视,其在气溶胶粒子形成和初始增长方面的作用显著。Kirkby等在硫酸浓度极低的环境下研究了HOM compounds形成新粒子时(直径约1.7 nm)的效率^[6],发现不需要硫酸HOM compounds就能完成核化过程,且成核效率依赖宇宙射线(GCRs),该结果也预示着未来可以将太阳磁极、气溶胶粒子、气候变化等联系起来研究。Tröstl等研究了HOM compounds在粒子的后续增长中(直径为2~20 nm)的作用^[7],指出HOM compounds的自身特性减弱了Kelvin效应使得液滴能够加速凝结增长。以上两项研究均为实验室研究,使用的VOCs为树木释放的 α -蒎烯。Bianchi等通过在瑞士少女峰上开展的野外观测实验进一步证明了在硫酸浓度很低的情况下,只要HOM compounds浓度足够粒子的核化过程将非常高效^[8]。气溶胶能够抵消部分温室气体造成的增温效应,所以曾有科学家警告消除煤厂排放的二氧化硫造成硫酸盐气溶胶减少进而失去气溶胶的冷却效应。而此研究表明,依靠树木排放的有机物同样可以生成气溶胶和云相互作用,调节气候。

气溶胶与云相互作用发挥着重要气候效应,但其量级始终具有高不确定性,Malavelle等基于对火山喷发产生大量硫酸盐气溶胶的研究完成了这一任务^[9]。通过对2014—2015年期间胡勒汉、冰岛等地大量火山喷发事例的研究,发现随着气溶胶数量的上升云滴粒径下降、云反照率升高,造成了2014年9—10月期间 -0.2 w/m^2 的全球平均辐射强迫,此外云量、液态云水路径等其它特征均无显著变化。由此表明大部分云系对气溶胶引起的变化呈现缓冲作用,通常气候模式过高估计了气溶胶和云相互作用的气候效应。

4 国际、国内研究导向

4.1 国际研究导向

IPCC AR5显示,在所有的大气驱动因子中气溶胶和云相互作用的辐射强迫信度水平最低,较第四次评估报告(AR4)

没有显著提高,具体原因如下^[10]:

1) 气候模式对气溶胶和云相互作用量化难度大,气溶胶造成的云调节影响气候,反过来气候变化也影响气溶胶的清除过程。

2) 不同气候模式不同次网格过程导致的云对全球气候变化响应模拟结果的差异以及气溶胶和云相互作用与气候效应的尺度匹配问题亟待解决。

3) 观测手段的发展加深了人类对气溶胶和云相互作用过程的理解进而为气候模式引入了更多相关过程,但这些过程的信度和必要性值得关注。这些都表明气溶胶和云相互作用在未来仍是亟待研究的领域。

4.2 国内政策导向

国家科技部长期以来对云、气溶胶及其相互作用的研究十分重视,2013年立项了全球变化研究重大研究计划“云、气溶胶及其气候效应的观测与模拟研究”。通过气溶胶—云滴核化过程、云宏观参数及大气廓线的综合观测,气溶胶、云、降水过程及其相互作用机理的分析,了解中国地区云、气溶胶和降水等变化特征,揭示以上因子相互影响的物理过程和机制,改进发展相关物理和化学过程的参数化方案进而减小气候模拟的不确定性。2017年立项的“大气污染成因与控制技术研究”重点专项中“影响区域排放与沉降响应的关键大气过程”及“十三五”国家基础研究专项规划部署的重点研究“全球变化及应对”也均与本研究紧密相关。国家自然科学基金委员会也将云和气溶胶的气候效应研究放在重要地位,2016年启动“中国典型地区云系结构与辐射气候效应研究”重大项目,旨在对我国典型地区的云系了解其辐射特性三维空间分布在内的宏、微观特征,探究云—辐射过程机理,提出云和辐射的参数化方案以服务于我国代表区域的天气预报和气候变化预测模式。而2017年度重点项目中“天气、气候与大气环境过程、变化及其机制”领域的“大气气溶胶、云和降水相互作用”和“全球环境变化与地球圈层相互作用”领域的“区域水循环及其与气候变化的关系”也被确定为重点资助的研究方向。

未来,气溶胶和云的相互作用是国际上全球气候变化研究的热点和难点,对我国来说意义更是重大。在科学层面

上,该问题是我国全球变化研究的前沿也是国家科学发展规划的重点,需要深入了解气溶胶和云相互作用对天气、气候的影响机理,提出相应的参数化方案服务于我国天气预报和气候变化预测;在国家层面上,该问题关乎国家发展与安全,急需多部门、多学科协同研究,培养一批该领域的领军人才,为我国防灾减灾、环境外交提供理论支持。

参考文献

- [1] 杨慧玲,肖辉,洪延超.气溶胶对云宏观特性和降水影响的研究进展[J].气候与环境研究,2011,16(4):525-542.
- [2] 李军霞,银燕,李培仁,等.气溶胶影响云和降水的机理和观测研究进展[J].气象科学,2014,34(5):581-590.
- [3] 刘卫国,苏正军,王广河,等.新一代机载PMS粒子测量系统及应用[J].应用气象学报,2003,14(增刊1):11-18.
- [4] 段婧,毛节泰.气溶胶与云相互作用的研究进展[J].地球科学进展,2008,23(3):252-261.
- [5] 楼小凤,师宇,李集明.云降水和人工影响天气催化数值模式的发展及应用[J].气象科技进展,2016,6(3):75-82.
- [6] Kirkby J, Duplissy J, Sengupta K, et al. Ion-induced nucleation of pure biogenic particles[J]. Nature, 2016, 533(7604): 521.
- [7] Tröstl J, Chuang W K, Gordon H, et al. The role of low-volatility organic compounds in initial particle growth in the atmosphere[J]. Nature, 2016, 533(7604): 527.
- [8] Bianchi F, Tröstl J, Junninen H, et al. New particle formation in the free troposphere: A question of chemistry and timing [J]. Science, 2016, 352(6289): 1109.
- [9] Malavelle F F, Haywood J M, Jones A, et al. Strong constraints on aerosol-cloud interactions from volcanic eruptions[J]. Nature, 2017, 546(7659): 485.
- [10] 张小曳,廖宏,王芬娟.对IPCC第五次评估报告气溶胶-云对气候变化影响与响应结论的解读[J].气候变化研究进展,2014,10(1):37-39.

文/莫欣岳,李欢,张镭

作者简介 莫欣岳,兰州大学大气科学学院,博士研究生;李欢,兰州大学信息科学与工程学院,博士研究生;张镭,兰州大学大气科学学院,教授。

(责任编辑 祝叶华)