

## 云程十载,气象万千——中国地质大学(武汉)大气学科发展专刊

中国地质大学(武汉)大气科学系成立于2015年,始终坚持以“入主流、强特色、谋跨越”为方针建设大气科学学科.结合地处华中、暴雨洪涝等灾害性天气气候频发等特点,学科确立了“地”、“气”结合的四个研究方向,包括气候变化与古气候模拟、灾害性天气、大气动力学与区域水循环、源排放与区域大气环境.学科发展分为三个步骤:第一步,初创期着重开展“气候变化与古气候模拟”的研究和教学,通过年代尺度到古气候的模拟研究,实现大气科学与地质学的学科交叉,融入气候变化研究这一国际热点领域,从而进入大气科学主流;第二步,拓展“强灾害天气过程”研究方向,聚焦与地质灾害密切相关的气象灾害问题;针对华中区域空气污染的特点,深入“污染物源排放与源解析”的研究,发展出学科特色和优势;第三步,发展“大气动力学与区域水循环”研究方向,重点研究地气交互作用及其环境效应特色领域,实现跨越式发展.

2025年是大气科学系成立及大气学科发展的十周年.十年来,依托学校雄厚的多学科交叉优势和国家重大科研任务的牵引,大气科学学科不断拓展研究边界、凝练学科方向.经过不懈努力,大气学科基本完成了发展的第一阶段,在多个研究方向上取得重要突破,其中古气候模拟研究已发展为国内的特色方向,初步实现了大气科学的“入主流”.

值此十周年华诞之际,大气科学系特辑此期专刊,收录了师生12篇学术论文,旨在集中展现本学科于基础研究、前沿探索及服务国家重大战略中的最新成果,亦为十年砥砺前行之阶段性小结.论文内容涵盖区域气候预测、极端天气机理、气候-生态系统相互作用及污染物排放治理等前沿领域,充分展现了学科在应对气候变化等重大科学与社会问题方面的综合创新能力与学术担当.“云程发轫,万里可期”,愿地大大气学科乘风破浪,再启新篇.

### 领域一.气候变化与古气候模拟

(1) 我国西北暖湿化的年代际预测技巧及其来源评估 作为全球最大干旱半干旱带以及“丝绸之路经济带”的核心区,我国西北地区自上世纪80年代以来出现了温度升高、降水和径流增加、植被变绿等现象.“寒冷干旱的中国西北正在变暖变湿”,这引发国际社会对西北地区气候暖湿化的关注和讨论.但这一变化受到外强迫及内部变率等多种复杂因子的影响,因此其历史成因和未来趋势仍存在很大争议.魏韵(大气科学系副教授)等通过评估CMIP6(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)中年代际气候预测计划(Decadal Climate Prediction Project, DCP)多模式对西北地区暖湿化的年代际预测技巧,分解外强迫与内部变率对预测技巧的相对贡献结果表明,DCPP多模式模拟结果中,外强迫分量对西北变暖的贡献在80%以上.西北地区降水的年代际预测技巧同时受到初始化和外强迫的影响,模式间差异显著,初始化分量的贡献为19%~94%.该研究明确了西北暖湿化模拟偏差的主要来源以及未来气候订正预估的改进方向,西北地区的未来短期气候预估订正,变暖需要考虑外强迫因素的影响,变湿需要同时考虑初始化和外强迫的作用.

(2) 1982—2018年总初级生产力对不同时空尺度干旱类型的响应 在全球气候变化背景下,干旱事件的频率、强度和持续时间显著增加,对陆地生态系统结构与功能的影响日益显著.然而,当前对于不同类型干旱(如气象干旱、农业干旱和水文干旱)对生态系统生产力影响的差异性认识仍不充分,制约了我们对生态系统干旱胁迫响应机制的全面理解.凌肖露(中国矿业大学环境与测绘学院副教授)和牛晓瑞(大气科学系教授)等基于1982—2018年的GLASS(Global Land Surface Satellite)植被总初级生产力(gross primary production, GPP)数据和多类型干旱指数,定量评估了中国大陆不同区域GPP对干旱的响应特征.结果表明,夏季GPP距平与极端干旱发生的时间高度关联,但响应模式存在显著的区域差异.其中,华东和华

南地区的GPP对农业干旱最为敏感,平均滞后时间为4至6个月,内蒙古、西北和西南地区对气象干旱的响应更为剧烈,滞后时间达9~11个月,而华中和华东地区对气象干旱的响应周期较短(0~3个月).本研究为区域生态系统适应性管理和干旱风险评估提供了科学依据.

(3) CLM5-FATES模式对中国长白山针阔混交林分布的模拟 长白山阔叶红松林是全球唯一大面积原始针阔混交林,在全球生物多样性保护、国家碳汇及全球碳循环中占据重要地位.亟需使用基于植被功能性状的新一代模式对其开展模拟研究.过去相关的研究多集中在北美洲和热带地区的常绿阔叶林,对我国以及针阔混交林的关注不足.隋月(大气科学系讲师)等选取25℃时最大羧化速率、比叶面积和叶寿命三个叶片特性参数,使用新一代动态全球植被模式CLM5-FATES(Community Land Model version 5-Functionally Assembled Terrestrial Ecosystem Simulator)对长白山针阔混交林分布进行模拟,探讨模式中长白山针阔混交林分布的参数敏感性,检验模式对长白山针阔混交林分布的模拟能力.结果表明,不同的性状参数组合显著影响该地区两种植被类型分布的模拟结果,且25℃时最大羧化速率和比叶面积的影响大于叶寿命.适当的性状参数组合下,模式能再现观测结果中的长白山针阔混交林分布.该研究验证了该模式在长白山针阔混交林的适用性,对新一代模式的发展有重要意义,为进一步的气候植被相互作用研究提供重要支持.

## 领域二.灾害性天气

(4) 北太平洋急流对北美冬季温度偶极子的影响机制 近年来,北美冬季“西暖—东冷”温度偶极子天气频繁发生,导致西部加州干旱和美国东部极寒,引发了国内外学者对区域极端天气的广泛讨论.然而,目前对北美温度偶极子成因的理解尚不充分,北太平洋急流与北美温度偶极子之间联系的物理机制仍不清晰.戈瑶(山东省气象台高级工程师)和巫明娜(大气科学系副教授)等基于NCEP大气再分析数据和HadISST(Hadley center global sea ice and sea surface temperature),系统分析了影响北美温度偶极子的大气环流、西风急流和海温背景.结果表明,北美温度偶极子主要受正位相的太平洋—北美遥相关(Pacific-North American pattern, PNA+)环流的影响.在正位相太平洋年代际振荡(Pacific decadal oscillation, PDO+)冬季,中纬度西风急流偏南,PNA+环流在北美地区呈现经向结构,导致“西北暖—东南冷”的温度异常.此外,正位相维多利亚海温模态(Victoria mode, VM+)有利于中纬度西风急流的减弱,促使PNA+在北美西部的高压向西移动,东部低压持续存在,形成水平波列结构,该结构增强了中高纬度冷暖空气的交汇,造成强“西暖—东冷”温度偶极子异常.研究明确了影响北美温度偶极子的环流形势,揭示了太平洋海温通过急流位置和强度改变PNA环流结构,进而影响北美温度偶极子的物理过程,对提高极端温度预测具有重要的科学意义和经济价值.

(5) 西北太平洋热带气旋生成—快速增强复合事件的对流及环境特征 热带气旋(俗称“台风”或“飓风”)是对我国影响最为严重的灾害性天气系统,其生成与强度的准确预报历来是业务中的关键难点.部分热带气旋在生成后会迅速增强,形成“生成—快速增强”复合事件(rapid intensification following genesis, RIFG),显著增加了灾害预警和防范的难度.然而,由于RIFG事件涉及多尺度的动力与热力过程,其触发机制目前仍未被充分认识.施东雷(大气科学系副教授)等利用多源观测资料,采用合成分析方法,系统研究了西北太平洋RIFG事件的对流结构及环境特征.结果表明,RIFG事件更易在低纬度区域发生,其发生时热带气旋核心区往往伴随更强的降水活动和更为对称的降水分布.同时,RIFG事件通常处于多种有利的大尺度环境背景下,包括较弱的垂直风切变、较强的中低层相对涡度、高层辐散、较高的相对湿度和海表温度等.此外,研究还进一步揭示了不同垂直风切变强度条件下RIFG事件对流特征的差异.该研究结果有助于深化对热带气旋生成—快速增强复合事件的多尺度特征和物理机制的认识,并揭示了针对于该事件的一系列潜在的预报因子,为提高热带气旋强度预报的准确性提供了理论支撑.

## 领域三.大气动力学与区域水循环

(6) 南半球中高纬度气旋对南极海冰面积的影响 作为全球变暖最敏感的区域之一,南极海冰变化在近年来呈现出显著的区域差异性,尤其是边缘区域海冰面积波动频繁,成为极地

气候变化研究的热点问题。南极海冰不仅深刻影响区域气候与生态系统,还通过能量收支与环流调整作用影响全球气候系统。然而,尽管已有研究关注南极海冰对南半球环状模(Southern Annular Mode, SAM)等大尺度环流的响应机制,中高纬度气旋这一重要中尺度天气系统在冰变化中的作用仍缺乏系统量化评估。为此,陈蕾(大气科学系副教授)等基于1979—2022年欧洲中期天气预报中心(European center for medium-range weather forecasts, ECMWF)再分析资料,对南半球中高纬气旋开展了长期序列的识别与追踪,并结合海冰密集度和海冰边缘线分布,系统评估了气旋频数对南极海冰面积变化的年代际影响。结果表明,气旋对海冰的影响主要集中在海冰密集度低于80%、变化频繁的边缘区。在这些区域,气旋活动是驱动海冰密集度波动的主要因子,且其影响随背景海冰状态增强而减弱,表现出明显的调节效应。南极海冰总体上受SAM调控,但边缘区气旋的局地扰动效应更加突出。本研究将气旋轨迹识别方法与气候统计分析相结合,首次系统量化了中高纬度气旋对南极海冰边缘区的扰动机制,为理解冰变化的多尺度驱动因素提供了新视角,也为极地气候模拟与预估模型改进提供了理论依据。

(7) 长江流域秋季大尺度旱涝转折变化特征及天气形势转换 秋季是长江流域水库群蓄水的关键时期,此时若发生旱涝急转或涝旱转折,将对水库蓄水效能、发电调度及冬季水资源保障产生重大威胁。然而以往研究多聚焦夏季,对秋季旱涝转折的机制和规律认知严重匮乏,制约了流域水资源风险防控能力的提升。王乐(长江水利委员会高级工程师)和谭鑫(大气科学系副教授)等通过综合考虑旱涝转折强度和速度的多尺度标准化旱涝急转指数(multi-scale standardized DFAI index, MSDFAI),分析了长江流域秋季旱涝转折事件的时空变化特征,并从大气驱动的角度分析转折前后的天气转换形势。结果表明,秋季旱涝转折高发区集中于金沙江中下游、雅砻江上游、岷江、嘉陵江、乌江、汉江石泉以上及鄱阳湖水系,其中中度事件占比最高。以1990年代中期为界,此前旱涝转折范围和强度呈减少趋势,此后显著增加。长江上游及汉江上游为秋季旱涝转折关键区,转折前期关键区受位势高度负异常控制,风场与水汽呈辐散异常,垂直方向为干燥下沉气流,抑制降水;转折后期副高西伸加强,北方低压槽南压,长江中下游位势高度正异常,上游风场转为辐合,垂直上升气流增强,触发强降雨。该研究系统分析了长江流域秋季旱涝转折的时空规律,揭示了秋季旱涝转折的天气形势转换机制,为秋季水库群优化管理、旱涝灾害风险防控提供了科学依据,对保障流域水安全具有重要的价值。

#### 领域四. 源排放与区域大气环境

(8) 源排放大气气溶胶中可溶性铁特性、影响因素及清单估算研究进展 大气气溶胶中可溶性铁对海洋初级生产力、气候变化、大气二次污染和人体健康都具有重要影响。不同人为源排放铁的可溶性,及其影响因素与协同或拮抗作用,目前仍没有共识;源排放颗粒物采集和分析方法代表性不足,清单构建参数简化与引用中产生的系统性偏差;这些都影响了可溶性铁排放量与生物地球化学循环的精准估算和模拟。孔少飞(大气科学系教授)等总结了气溶胶中铁及可溶性铁的来源解析、可溶性影响因素及作用机制、样品采集和测试方法研究进展,归纳总结了燃烧源排放可溶性铁的清单构建方法与存在问题。研究发现,现有定性识别铁来源的方法主要有富集因子、因子分析和单颗粒表征;大气化学模式和生物地球化学模式模拟各类源对铁沉降贡献率存在较大差异;应结合烟气参数、燃烧参数、气溶胶理化特性等,采用大数据方法揭示复杂因素对铁可溶性的耦合作用及机制;飞灰浸出实验不能反映真实大气环境条件下的气溶胶pH,导致铁的可溶性往往被高估;可溶性铁排放因子测试为空白,应直接采集烟气飞灰中不同粒径气溶胶样品,分析其可溶性铁和总铁含量,获得燃烧源排放分级气溶胶中可溶性铁排放因子,并跳出以往的间接构建清单思路框架,只考虑实测排放因子和燃料消耗量两个参数,以显著提升清单精度,降低清单不确定性。研究可为准确认知可溶性铁的来源,构建高精度可溶性铁的排放清单,改进生物地球化学模式模拟铁沉降量和海洋初级生产力,提升大气化学传输模式模拟二次气溶胶精度,以及揭示影响人体内可溶性铁的来源及其定量贡献提供理论依据和研究方法借鉴。

(9) 中国民用生物质和煤炭燃烧细颗粒物中二噁英的排放特征及排放清单 近年来,民用固体燃料(生物质和煤炭等)燃烧对二噁英(PCDD/Fs)排放的贡献日益凸显。其中,细颗

颗粒物( $PM_{2.5}$ )对PCDD/Fs等具有极强的吸附能力,对于空气质量和人体健康具有重要影响.目前,仅有少数研究对民用生物质燃烧 $PM_{2.5}$ 中的PCDD/Fs排放进行了实测,关于民用煤炭燃烧 $PM_{2.5}$ 中PCDD/Fs的排放实测严重滞后.吴剑(大气科学系副教授)等通过室内模拟燃烧装置和稀释通道采样系统,采用同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱法,对民用生物质和煤炭燃烧 $PM_{2.5}$ 中的PCDD/Fs排放特征进行分析,获得了其PCDD/Fs排放因子,构建了中国民用生物质和煤炭燃烧 $PM_{2.5}$ 中的PCDD/Fs排放清单,并评估了其健康风险.结果表明,民用生物质和煤炭燃烧是 $PM_{2.5}$ 中PCDD/Fs排放不容忽视的重要来源.垃圾焚烧和工业燃烧 $PM_{2.5}$ 中PCDD/Fs的排放量分别是民用生物质和煤炭燃烧排放量的0.2倍和1.5倍.民用生物质和煤炭燃烧 $PM_{2.5}$ 中PCDD/Fs排放导致的个人吸入的平均健康风险分别是从事各类工业生产活动的职业工人的3.3倍和1.1倍.研究结果突出了民用生物质和煤炭燃烧 $PM_{2.5}$ 中PCDD/Fs排放的重要性,并可为中国PCDD/Fs排放的科学管理及控制等提供有效支撑.

(10) VOCs排放控制对SOA和 $O_3$ 的减缓作用 当前,中国面临着细颗粒物( $PM_{2.5}$ )污染严重和臭氧( $O_3$ )污染日益突出的双重问题.其中,挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是臭氧( $O_3$ )和二次有机气溶胶(secondary organic aerosols, SOA)的重要前体物.然而,目前关于VOCs排放控制对SOA和 $O_3$ 缓解作用的研究仍然不足.马静(大气科学系博士研究生)、燕莹莹(大气科学系副教授)和王五科(大气科学系教授)等总结了四大排放源的精细化VOCs减排潜力,进一步利用WRF-Chem模式量化了中国主要大气污染区污染事件期间VOCs减排对SOA和 $O_3$ 缓解的效益.结果表明,通过精细化VOCs减排,华北、长三角、华中、珠三角和四川盆地的SOA浓度分别降低了89.2%、81.2%、74.5%、72.0%和77.3%.其中,工业VOCs减排是SOA缓解的主要贡献因素.然而,由于 $O_3$ 及其前体物的非线性光化学过程,这种VOCs减排只能使 $O_3$ 浓度降低不到10%.华北、长三角、华中、珠三角和四川盆地的 $O_3$ 浓度分别降低了7.55、9.05、7.29、4.31和3.15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .减少工业、交通和居民VOCs排放分别使臭氧平均浓度降低了3.6%(3.48  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )、2.2%(2.07  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )和1.1%(0.98  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).本研究对于指导VOCs减排政策的制定,进一步缓解 $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ 污染具有重要的参考意义.

(11) 基于隧道实验的机动车大气污染物实时排放因子研究 机动车排放是影响城市空气质量的一类重要污染源,对于机动车排放大气污染物的精准管控,是我国空气质量持续改善的关键.当前广泛使用的模式模拟技术和实测技术难以在低成本下获取高准确性、高时间分辨率的机动车排放因子,制约着高精度和高分辨率清单构建.江惟总(大气科学系硕士研究生)等选取某城市隧道开展CO、NO、 $NO_2$ 、NOX、 $SO_2$ 、BC和 $PM_{2.5}$ 浓度以及车流量的在线监测,结合目标检测模式和跟踪算法对车流量、车速与车型构成进行识别,结合质量平衡原理和强度比值法计算机动车排放污染物动态排放因子.研究发现排放因子呈现明显24小时变化,各污染物的凌晨高值分别是其余时间平均值的2.0~3.5倍,早晚高峰是其余时段平均值的1.8~3.3倍;车流量与机动车实时排放因子并非简单的线性正相关,依靠实时车流量对排放清单进行高精度时间分配,会引起较高不确定性.该研究提出的基于图像识别技术的分车型机动车流量识别方法可为后续研究提供借鉴,获得的大气污染物动态排放因子可为高精度清单构建提供基础数据.

(12) 武汉城市圈人为源排放 $PM_{2.5}$ 高分辨率清单估算及时空演变 高分辨率大气污染源排放清单是大气化学数值模式模拟精度提升的关键,制约着大气污染预报的准确性、时效性以及大气细颗粒物( $PM_{2.5}$ )污染管控的精准性.武汉城市圈是我国大气污染防治的重点区域之一,但针对该区域的人为源排放 $PM_{2.5}$ 高分辨率清单仍是空白,制约着区域 $PM_{2.5}$ 的精确模拟和防控.陈德靓(大气科学系硕士研究生)等基于排放因子法,估算了武汉城市圈2017—2023年人为源 $PM_{2.5}$ 排放量,结合最新的代用参数,对排放量进行1 km $\times$ 1 km的空间分配,分析 $PM_{2.5}$ 排放总量和强度的多年演变及影响因素.结果表明,武汉城市圈 $PM_{2.5}$ 排放总量在2018年达峰值(164.59 kt),2020年因疫情降至137.15 kt,2023年反弹至149.97 kt.工艺过程源和扬尘源为主要贡献源,占 $PM_{2.5}$ 总排放的46.5%~52.6%和26.7%~31.8%.区域内 $PM_{2.5}$ 排放强度在中心城区为600~800 t/ $\text{km}^2$ ,是郊区、农村区域排放强度的40~50倍.本研究可为揭示武汉城市圈 $PM_{2.5}$ 排放的时空演变、 $PM_{2.5}$ 模拟精度改善和大气污染精准防控提供科学认识和数据支撑.