

气溶胶对中国天气、气候和环境影响综述



李占清*

马里兰大学 大气与海洋科学系, 马里兰州 大学园 20740

作者简介:李占清,南京信息工程大学学士(1983届)、硕士(1986届),加拿大McGill大学博士(1991届)。自2001年起任美国马里兰大学大气与海洋科学系教授,美国“地球物理研究(JGR)”编辑,欧洲“大气物理化学(ACP)”客座编辑。当选美国科学协会会员、美国地球物理协会会员、美国气象学会会员(Fellows of AAAS, AGU, AMS)。与国内多个科研院所、东京大学、德国马普研究所等单位开展合作、访问研究。主要研究领域卫星遥感、大气物理和气候变化,气溶胶、云、辐射、降水,地面与大气环境等。在地球辐射平衡、云吸收、气溶胶直接与间接气候效应、中国环境和气候变化等科学问题方面开展了较深入、系统研究。发表SCI文章320多篇,包括*Nature*(2篇),*Science*(3篇),*PNAS*(2篇),*Rev Geophy*(2篇),*JGR*(约100篇)等。论文引用17 000多次,H-index 75(Google Scholar),地球与环境科学领域高被引中国学者。荣获美国地球物理联合会大气学科杰出研究成就和无私合作奖Kaufman奖、加拿大公务员最高奖、航空航天协会奖、德国洪堡基金会研究成就奖等10多项国际奖。曾作为美国外裔科学家代表刊登在“科学”杂志封面,研究发现被众多国际媒体报道,点击过亿。

* 联系人, E-mail: zli@atmos.umd.edu

2020-01-15 收稿, 2020-01-25 接受

国家自然科学基金资助项目(91544217); 国家重点研发计划资助项目(2017YFC1501702)

摘要 空气污染、天气和气候与大众生活息息相关,全球变化与可持续发展更是全人类面临的共同挑战。空气污染与气候变化对发展中国家带来的挑战更为显著。中国作为人口最多、发展飞速的国家,面临这两方面的挑战尤为严峻。因此,深入了解空气污染与气候变化的成因和发展机制,摸清两者相互关系对提高人们的生活质量和科学发展方针政策的制定具有指导意义。随着全球变化研究的深入,气溶胶与温室气体作为影响地球气候的两个最重要的人类排放物,在气候变化科学中起着至关重要的作用,气溶胶研究也成为地球科学发展最快的一个分支学科。中国天气、气候的变化特征,如高温增多、寒潮变少、风速减小、大气变稳、小雨减少、大雨增多、雷暴增强、季风减弱等,与空气污染都存在不同程度的联系。本文主要综述气溶胶对我国天气、气候的影响以及与气象因素相关的空气污染问题,侧重于气溶胶与极端天气事件之间包括影响程度和影响机理在内的错综复杂的关系。研究方法涉及星、地、空综合观测资料分析和模式模拟等。观测资料包括长时间历史观测资料、短时段强化观测实验资料、全球卫星资料等。

关键词 气溶胶; 空气污染; 天气气候; 极端天气事件

人类活动对自然环境、天气和气候有显著影响。作为世界上人口最多,发展飞速的发展中国家,中国经济的可持续发展以及人民健康都与此息息相关。从20世纪70年代末的改革开放开始,空气污染问题日益突出,尤其是在沙漠化、城市化、以及二次气溶胶的产生方面。中国在过去几十年里,硫酸、含碳和矿物尘埃气溶胶浓度显著增加。值得欣慰的是,近些年由于各类减排措施的实施,空气污染得到有效抑制,许多污染指数稳步下降(Li et al., 2017a; Zhang et al., 2019)。大量的气溶胶会降低空气质量、改变大气理化特性,进而影响天气和气候。气溶胶的不同影响程度反映在各种气象参数的变化中,尤其是温度和降水等基本气象要素的变化中(Menon, 2002; Qian et al., 2009; Li et al., 2016; Wu et al., 2016; Li et al., 2019;)。

作为改变地气辐射能量收支以及云滴形成的基本元素,气溶胶对全球气候变化有着重要影响,而且长期以来也是各种人为气候强迫中最不确定的变量(IPCC, 2013)。20世纪90年代以前,绝大多数气候模式都没有考虑该因素,因此造成了全球变暖的过高估计。最基本的硫酸气溶胶的引进就使得全球平均温度的模式预测值非常接近于实际观测(Mitchell et al., 1995),但预测仍存在很大的区域误差,其中一

引用格式:李占清,2020.气溶胶对中国天气、气候和环境影响综述[J].大气科学学报,43(1):76-92.

Li Z Q, 2020. Impact of aerosols on the weather, climate and environment of China: an overview[J]. *Trans Atmos Sci*, 43(1): 76-92. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200115005. (in Chinese).

一个重要原因是未考虑吸收型的黑炭气溶胶。黑炭气溶胶不仅会削弱到达地面的太阳辐射,同时通过吸收大气辐射从而显著改变地气能量收支(Li et al., 1995, 1997; Li, 1998)。

气溶胶对云的间接效应,即通过改变云的宏观和微观特性从而改变地球能量收支存在更大的不确定性(Twomey, 1974; Feingold et al., 2003; Tao et al., 2012; IPCC, 2013; Fan et al., 2016; Li et al., 2017b)。气溶胶可作为云凝结核或冻结核影响云的形成和发展(Aitken, 1882; Köhler, 1936)。Twomey 效应(Twomey, 1974)或气溶胶第一间接效应(FIE)指出,在大气柱体云水含量一定时,气溶胶浓度的增加导致云滴有效半径减小。其影响强度又受气溶胶和大气条件所制约(Feingold, 2003; Rosenfeld and Feingold, 2003; Kim et al., 2008; Liu et al., 2016a, Liu and Li, 2018a, 2019)。气溶胶也能影响雷暴过程,增加闪电活动(Pinto et al., 2004; Yuan et al., 2011; Proestakis et al., 2016; Tan et al., 2016; Thornton et al., 2017; Wang et al., 2018)。

除上述气溶胶云微物理效应(Aerosol Cloud Interaction, ACI)外,气溶胶还可通过改变大气热力学条件对对流云的产生和发展产生影响,即气溶胶-辐射-相互作用(Aerosol Radiation Interaction, ARI)。ARI通过改变大气的热力学特征来改变大气环流,从而影响云和降水的发生。例如,黑炭气溶胶(BC)已被证明可以显著加热大气,蒸发云滴降低云量(Koren, 2004),产生稳定的大气层结(Li et al., 2017c),削弱对流减少阵雨(Guo et al., 2019),这可在一定程度上解释近几十年来中国夏季“南涝北旱”的降水变化特征(Menon, 2002)。黑炭气溶胶也可以使云蒸发更快(Ackerman et al., 2000)。相比之下,ACI的强弱根据不同云系和降水类型而变化,并且取决于气象条件,因此该效应对降水影响的量化研究仍有很大的不确定性,研究挑战性很大。

为深入上述问题的研究,迫切需要加强气溶胶对全球气候影响的评估。自20世纪80年代后期以来,全世界气溶胶相关研究论文数量几乎呈指数增长(图1)。据Li et al. (2019)统计,1990年至今,全世界气溶胶相关出版物的总数增加了10倍以上。国内气溶胶的研究浪潮比国外开始要晚十几年,但增速更快。2000年之前,中国每年有关气溶胶研究发表的SCI文章大概只有十几篇,如今每年超过1000篇,在20a的时间内增加了近百倍。这在很大程度上与中国对气候变化和空气污染的重视有

关。值得一提的是,作者曾于2001年初写信给科技部和国家自然科学基金委员会(下称基金委)领导,呼吁中国加大气溶胶研究力度、开展国际合作交流,并和石广玉院士等专家一起多次举办气溶胶-辐射国际研讨会。2002年5月协调召开中美高层气溶胶-气候变化国际合作论坛,时任科技部部长徐冠华、基金委主任陈佳洱、美国宇航局和美国基金委负责人以及双方数十位专家都参加了会议。之后不久科技部和基金委都先后设立了许多气溶胶研究项目和课题,中国气象局、中国科学院和环保局都建立了气溶胶和大气化学监测网。同时作者也承担多项国际合作研究项目,包括利用最先进的美国能源部的流动气候观测站在国内开展气溶胶科学试验(Li et al., 2007, 2011, 2019; Li, 2020)。2008年奥运会的召开也极大地推动了中国环境和气候变化研究。国内气溶胶研究从此如雨后春笋快速发展起来了,这从气溶胶研究论文数量快速增长中也反映出来。

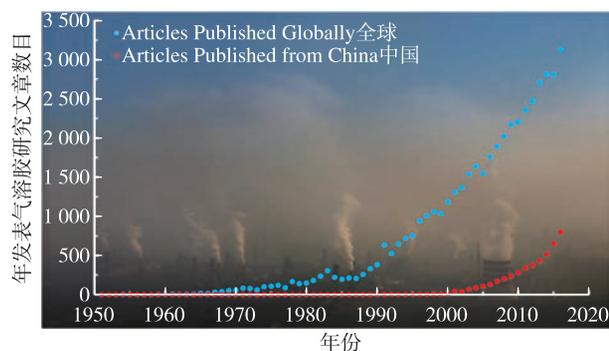


图1 全球及中国研究人员发表的有关气溶胶研究文章统计(蓝点表示全球,红点表示中国;引自Li, 2020)

Fig.1 Statistics of aerosol research articles published by global and Chinese researchers (blue dots: global, red dots: China; from Li, 2020)

本文主要从地面辐射,温度,云,降水,雷暴,边界层和空气污染几方面综述气溶胶对中国天气和气候的影响。

1 气溶胶对地面辐射和温度的影响

气溶胶由于其吸收、散射特性对地面太阳辐射产生影响。20世纪60年代至20世纪末,中国区域地面入射太阳辐射总体下降明显(Luo et al., 2001; Shi et al., 2008),但云量变化不明显(Qian et al., 2006)。因此,地面入射辐射的减少可能主要由于该阶段污染增加引起的。利用在香港连续同步观测的气溶胶和地面辐射资料(Li et al., 2007)以及全国20多个站点的气溶胶和辐射观测(Li et al., 2010)

估算了中国区域年均大气层顶、地面及大气中的气溶胶辐射强迫值,发现气溶胶的增加对中国区域太阳辐射变化影响非常显著(图2)。到达地面的太阳辐射和大气柱内吸收的太阳辐射相当(20 W/m^{-2}),地气能量收支差别高达 40 W/m^{-2} ,这将显著改变大气热力结构,影响对流过程的发生和发展,以及污染物的扩散(Li et al.,2017b)。

地面辐射减少可直接影响温度变化趋势(图3)。1960—1990年代气溶胶含量快速上升,期间全国大部分地区温度呈上升趋势,但在东部污染较重地区,温度呈下降趋势。温度上升与全球变暖关系密切相关,但在中国东部地区气溶胶辐射强迫相当于 CO_2 加倍辐射效应的数倍。如此强的辐射冷却作用,可完全抵消因 CO_2 增加引起的增温效应而导致的表面降温,从而显著改变大气稳定性和大气环流。这个观测推断与通过大气环流模式的模拟得到

的模拟结果基本一致(Niu et al.,2010)。当然气溶胶的生命周期远远短于温室气体,因此当统计时段加长到半个多世纪,全国基本都呈现增温趋势,气溶胶的辐射效应对东亚大气环流、气压、温度、湿度和雾也会产生一系列影响(Li et al.,2016)。

然而,温度的长期变化趋势受各种因素制约,如温室气体效应、下垫面变化(城市热岛效应)、大气环境变化以及大气自然变化等。归因和区分这些变化对全球变化的研究至关重要,但又极富挑战性。利用高山山顶(华山)、山底(华阴)和城市(西安)的长期温度变化趋势,近似估算出温度的变化(Yang et al.,2013b)。如图4所示,位于我国中部的华山,最高温度、最低温度和温度日较差均呈增长趋势。其临近的华阴,最高温度呈降温趋势,但最低温度仍然轻度增加。因气溶胶的影响主要在白天,对最高温度影响(降低)最显著,华山与华阴大气气候

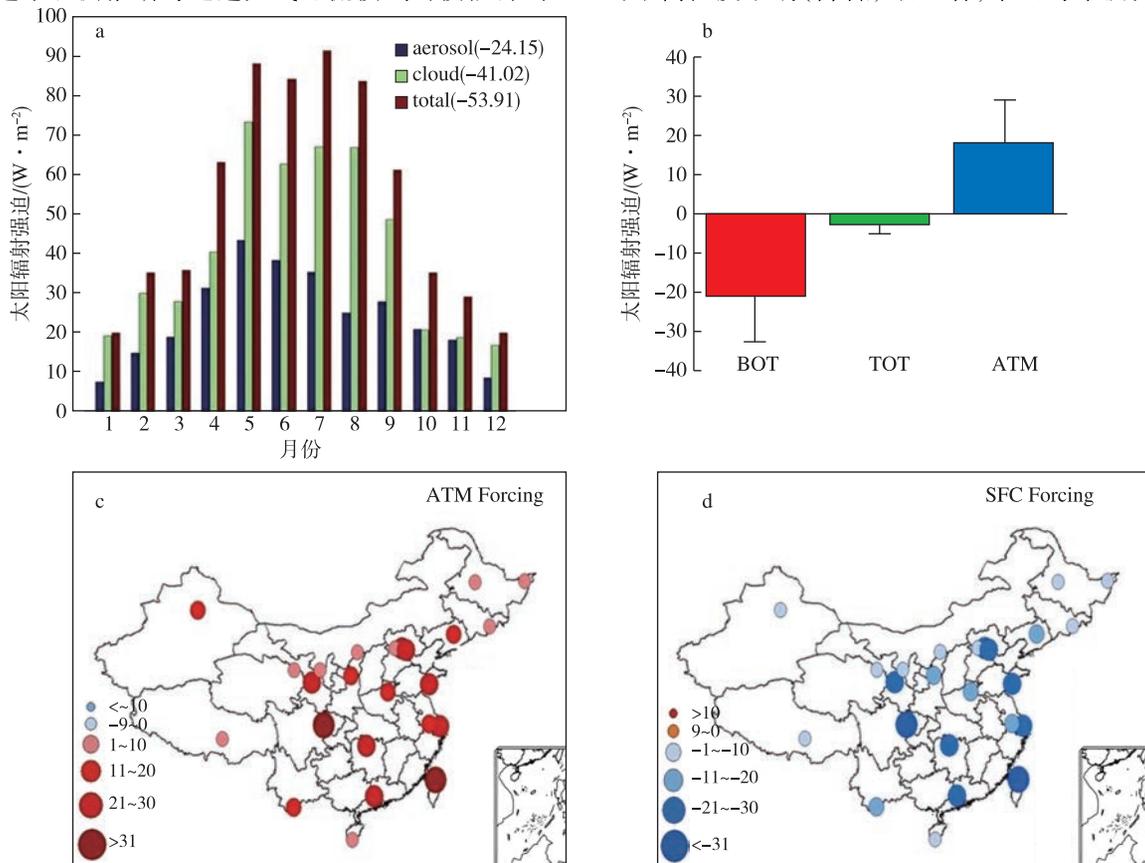


图2 香河观测到的由于气溶胶和云产生日平均和月平均直接辐射强迫(a;引自 Li et al.,2007),全国平均气溶胶引起的大气层顶部、底部和内部辐射改变(b),气溶胶增强的大气吸收太阳辐射(c;单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)以及气溶胶减少的地面太阳辐射(d;单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)(b—d图均引自 Li et al.,2010)

Fig.2 (a) The daily average and monthly average direct radiative forcing due to aerosol and cloud observed in Xianghe (from Li et al.,2007); (b) the change of atmospheric top, bottom and internal radiation caused by national average aerosol; (c) the atmospheric absorption of solar radiation enhanced by aerosol (unit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); and (d) the ground solar radiation reduced by aerosol (unit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) (Figs b-d are from Li et al.,2010)

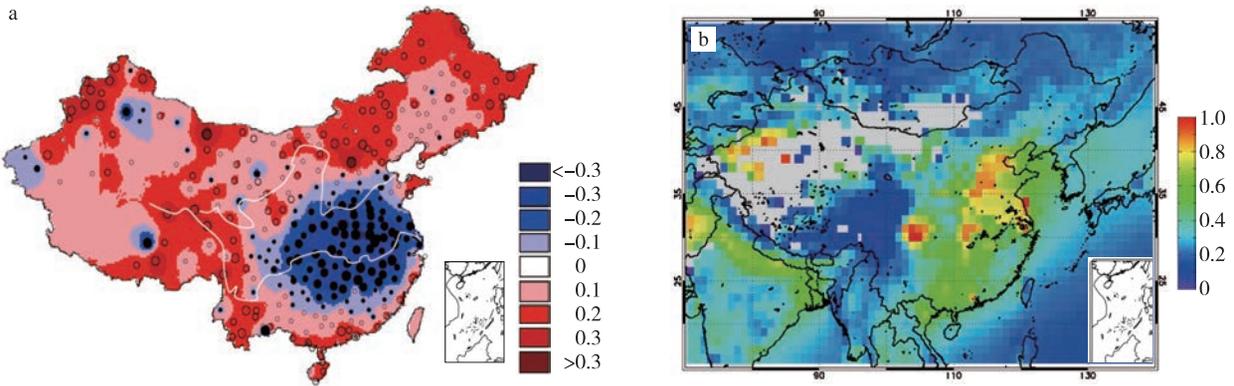


图3 1960—1990年代温度变化(a;单位: $^{\circ}\text{C}/(10 \text{ a})$)和气溶胶光学厚度(b)分布

Fig.3 (a)Temperature change (unit: $^{\circ}\text{C}/(10 \text{ a})$) in the 1960—1990 and (b) aerosol optical depth distribution

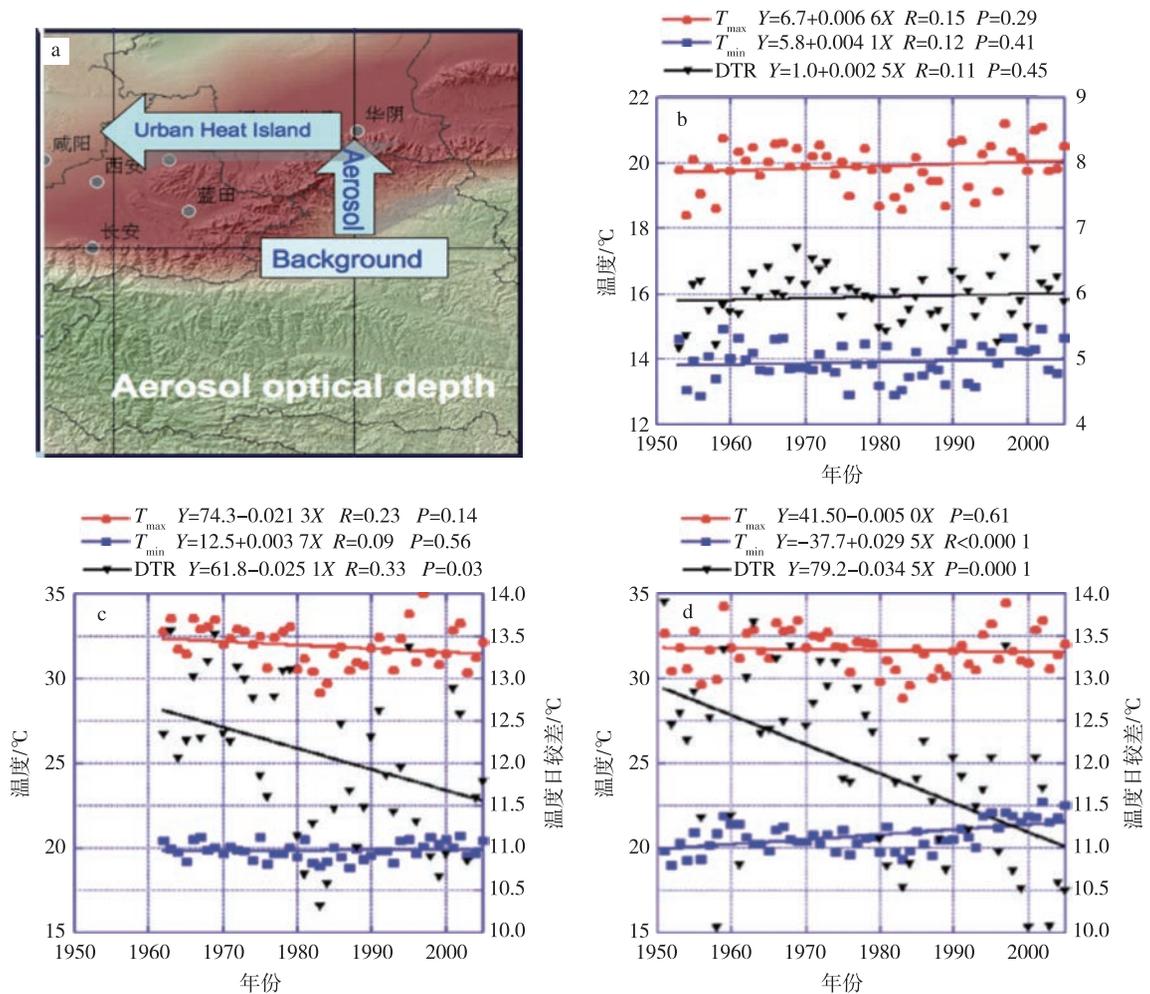


图4 关中平原与秦岭山区的地形和气溶胶分布(a;暖色表示高污染的关中平原地区)以及华山(b)、华阴(c)、西安(d)地面最高温度、最低温度及温度日较差的长时间变化(引自 Yang et al., 2013a)

Fig.4 (a)Topography and aerosol distribution in the Guanzhong Plain and Qinling Mountain areas (warm color refers to the high-pollution Guanzhong Plain area) and the long-term changes of the maximum ground temperature, minimum ground temperature and daily ground temperature range of (b) Huashan, (c) Huayin and (d) Xi'an (from Yang et al., 2013a)

背景及其变化极为相近,大气污染程度的不同是两处的最大差异。前者位于近 2 000 m 的高山顶部污染程度很轻,而地处关中平原的华阴污染程度更重,因此两处最高温度长期变化趋势的差异主要来自空气污染长期变化的影响。相反,城市化对最低温度影响最为显著。通过华阴和附近大都市——西安的最低温度变化趋势的不同可以看出,后者有明显增温趋势,但西安最高温度变化不明显,这可能是由于城市热岛效应抵消了由污染物增多而引起的降温。

为了验证这个基于观测结果所做出的科学推论,我们分析了 18 个全球气候模式(CMIP5)的历史情景试验模拟数据,评估了亚洲地区因气溶胶、温室气体和气候自然变化对最高、最低以及温度日较差的影响,模式与观测结果基本一致(Liu et al., 2016a)。不同地区气溶胶类型的不同,其造成气溶胶影响温度的效率不同,温度对气溶胶的影响在郑州最为敏感,说明该地气溶胶吸收性较强。

2 气溶胶对云的影响

气溶胶作为云凝结核,其含量增加一般使得云滴半径减小。研究发现,在中国东部的高污染条件下,云滴有效半径也可能随气溶胶光学厚度(AOD)增加而增大(Yuan et al., 2008; Tang et al., 2014; Wang et al., 2014; Liu et al., 2017)。此现象有多种解释,例如忽略了气溶胶和云层的重叠分布影响(Huang et al., 2015; Wang et al., 2015)。Liu and Li (2018b) 近期研究表明,更大可能的解释是忽略了气溶胶吸湿增长效应,因为潮湿条件下 AOD 的增加通常与云凝结核(CCN)的增加无关,而与大气稳定性和垂直风速有关。这些研究可解释许多过去关于该效应估算的主要差异(Liu et al., 2016b)。

经典的气溶胶云微物理效应会抑制暖云发展和降雨,使得更多水汽凝结并上升,如果达到冻结高度则有更多的潜热释放,从而进一步增强大气的向上运动和云的发生发展,导致深对流云(DCC)的云高和厚度增加(Koren et al., 2005, Rosenfeld et al., 2008; Li et al., 2011),这就是所谓的气溶胶激活效应(aerosol invigoration effect)。该效应不仅增加云厚,还增大云覆盖,尤其是伴随深对流云的卷云云砧面积(Fan et al., 2013)。云砧很薄很高对地气系统有增暖效应(Yan et al., 2014)。最新研究发现人类活动产生的大量超细气溶胶颗粒(以前认为不可能形成CCN)可以在水汽充足条件下核化增长、释放潜热,增

强对流和降水(Fan et al., 2018),这种云增强效应是在较暖的水云中发生,而前者是在深厚的冷云中发生,因此为区别两者可分别称为气溶胶暖云激活和冷云激活效应。该理论从最初提出、到验证、完善经历了约 10 a 时间(图 5)。借助中国地区长时间序列的地面能见度、MODIS、CALIOP 和 CloudSat 卫星数据,Chen et al. (2016) 证实了气溶胶的激活理论。

3 气溶胶对降水的影响

气溶胶通过改变近地面辐射能量收支的直接效应以及作为云凝结核的间接效应,对云和降水有重要影响(图 6; Li et al., 2017a)。但影响的不确定性也很大,尤其是影响的定量评估也存在严重不足。气溶胶对降雨的抑制作用,更多与气溶胶辐射效应有关,但增强作用通常由于凝结和冻结引起的潜热释放。随着 AOD 的增加,地面太阳辐射通量减少,导致热通量和对流有效势能减少,这对于对流云和降水的发展是不利的(Guo et al., 2016, 2017; Jiang et al., 2016),但气溶胶也可通过其激活效应使得降水增强(Li et al., 2011)。

通过上述分析可推测,没有考虑气溶胶效应的数值天气预报模式因此可能会产生系统误差,容易高估小雨,低估大雨。Jiang et al. (2017) 利用美国 NOAA 的全球预报模式的降雨预报和降雨观测结果,系统分析了降雨预报误差与气溶胶的关系,发现预报均方差随气溶胶光学厚度的增加而增大(图 7),这与上述气溶胶影响降雨的理论基本一致。同时利用长期资料详细分析福建省气溶胶对云和降水的影响,发现影响规律与美国南部大平原得到的结果基本一致(Li et al., 2011)。

气溶胶对中国地区的中小尺度降雨存在明显影响。郭建平研究组系统研究了气溶胶对不同尺度云和降水的影响(Guo et al., 2017, 2018, 2019),发现中国小尺度阵雨降雨从 19 世纪 70 年代至今有明显减少趋势。美国同期降雨也呈现减少趋势,气溶胶对两种趋势都存在影响,但影响机理不一致。气溶胶对云和降水的影响有一个拐点(Koren et al., 2008)。当气溶胶含量较低时,气溶胶促进降水和雷暴发展(Jiang et al., 2016; Wang et al., 2018)。在中国东部,气溶胶高过临界值,继续抑制降水,但美国地区的气溶胶在高于临界点后,仍继续减小,因而减少降水(Guo et al., 2019)。

中尺度对流系统(MCSs)对降水贡献很大,研究气溶胶对各种形式的 MCS 的影响,对天气和气

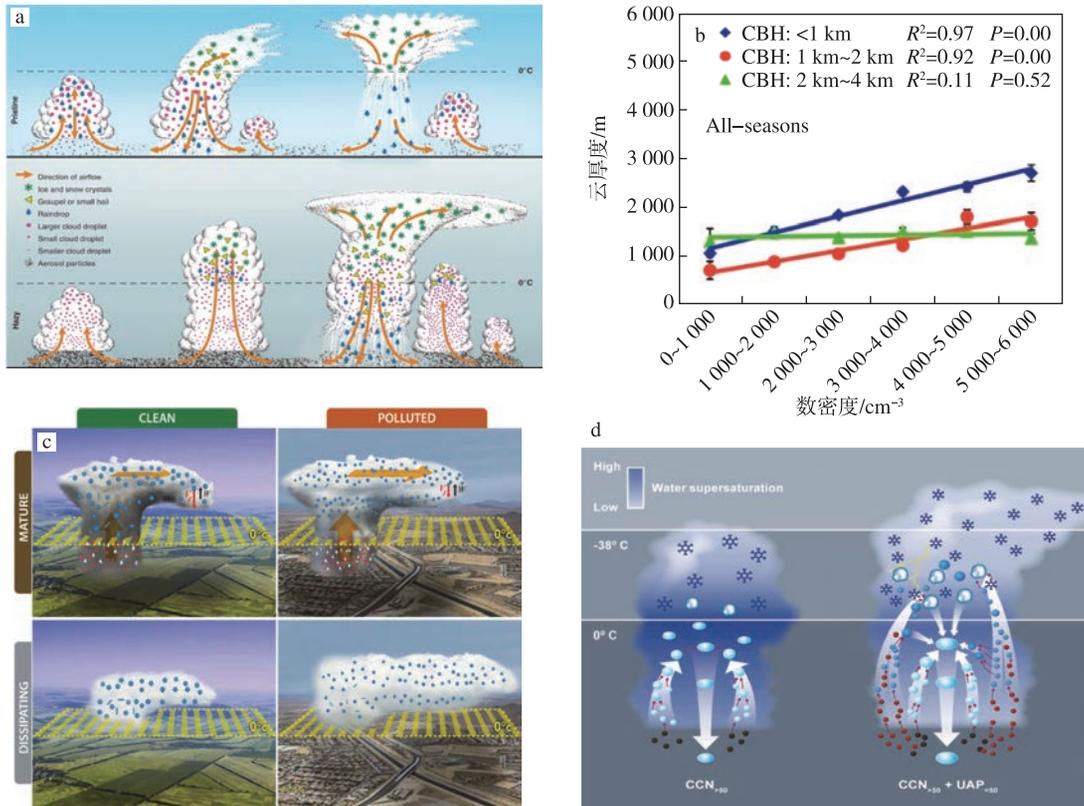


图5 气溶胶云促进效应理论完善发展过程(CBH:云底高度,CN:地面气溶胶数密度):理论假设的提出(a;引自 Rosenfeld et al.,2008)、理论观测验证(b;引自 Li et al.,2011)、理论完善(c,d;引自 Fan et al.,2013,2018)

Fig.5 Improvement and development process of aerosol cloud promotion effect theory (CBH: cloud base height, CN: surface aerosol number density): (a) proposal of theoretical hypothesis (from Rosenfeld et al.,2008); (b) theoretical observation verification (from Li et al.,2011); (c, d) theoretical perfection (from Fan et al.,2013,2018)

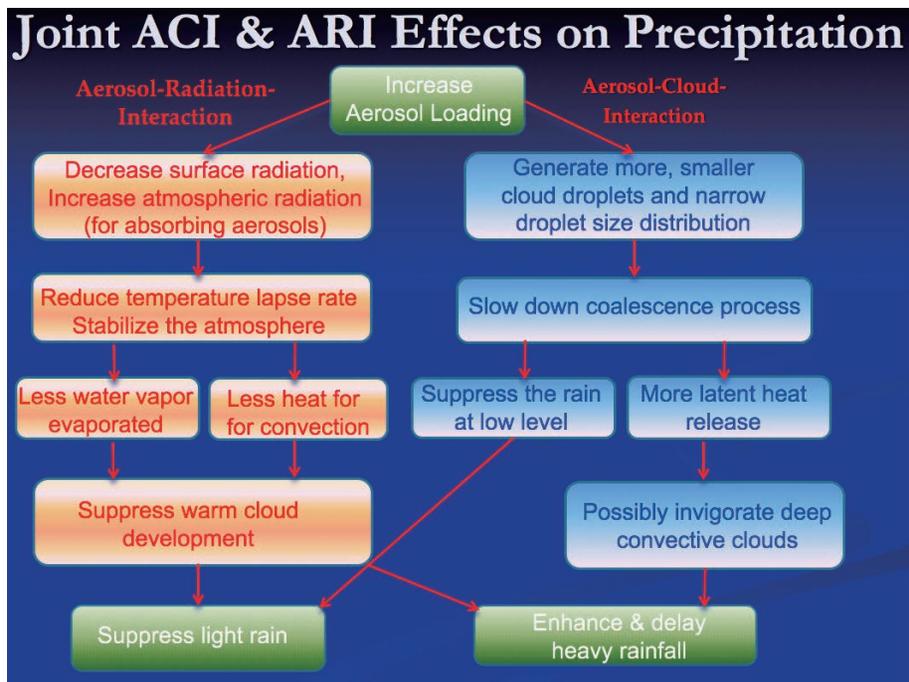


图6 气溶胶影响通过辐射和微物理效应影响降水原理(引自 Li et al.,2017b)

Fig.6 Principle of aerosol effect on precipitation through radiation and microphysical effects (from Li et al.,2017b)

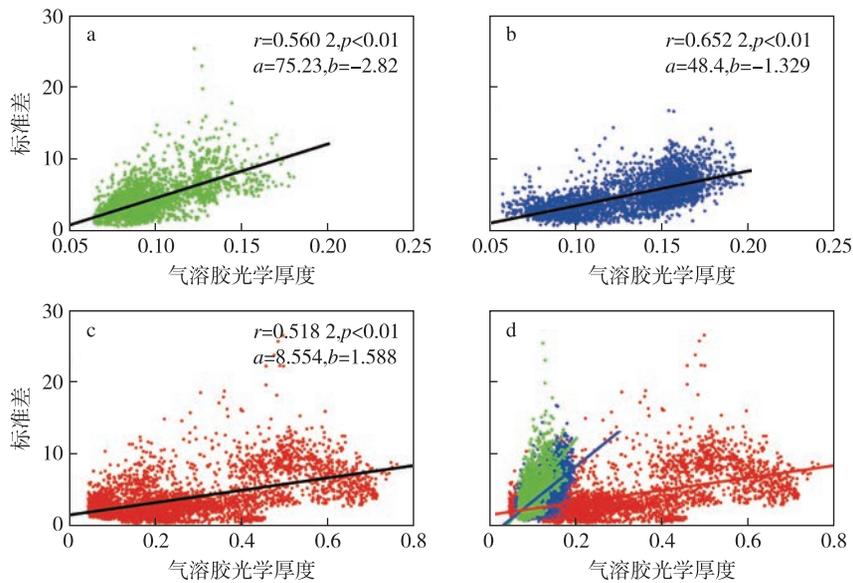


图7 美国 NOAA 的全球预报模式的降雨预报误差与气溶胶光学厚度的关系(引自 Jiang et al., 2017): (a) 澳大利亚; (b) 美国; (c) 中国; (d) 3 个国家的对比(绿色代表澳大利亚, 蓝色代表美国, 红色代表中国)
 Fig.7 Relationship between the root-mean-square-error in rainfall prediction by the NOAA Global Forecast Model and aerosol optical depth: (a) Australia; (b) United States; (c) China; (d) comparisons in these three countries(green: Austrilia; blue: USA; red: China)

候具有非常重要意义。但是这方面的研究工作有限。基于华东地区的夏季对流事件, Chen et al. (2015)发现不同垂直水平的强风切变改变了对流系统的组织,导致了不同类型的 MCS 和总降水量的形成。在所有类型的 MCS 中,气溶胶的增加会引起更强的上升气流和下沉气流。较强的上升气流和较大的对流核心区有助于产生较大的垂直通量并增强降水。气溶胶增加了累积降雨量和平均降雨率,并增加了大雨发生频率。该研究揭示了气溶胶对 MCSs 的影响,对温暖潮湿的长三角地区的天气和气候具有重要意义。

地形和气溶胶的综合效应对降水的影响也不容忽视(Guo et al., 2014; Fan et al., 2015)。除了大尺度大气环流和水分传输,气溶胶和地形抬升的耦合效应对降水预报也很重要(Rosenfeld et al., 2007; Fan et al., 2015)。

图 8 概括了中国地区气溶胶对云和降水的主要研究影响评估(Li et al., 2019)。这些研究涉及不同气溶胶类型(尤其是气溶胶的吸收和吸水特性)、云类型、不同天气状况、不同下垫面,其影响差别也很大。

3.1 气溶胶对暖云弱降雨的抑制作用

在同样云水含量情况下,高气溶胶含量导致的过小云滴可抑制降水形成。Yang et al. (2013a)分析了华山降水与周围平原站降水差值的变化趋势,

发现在 1980—2002 年以及 2002—2009 年两个阶段变化趋势相反,与能见度的逆转趋势在时间和变化特征上相对应(图 9)。说明在能见度降低时(也就是污染加重时),气溶胶对降水的抑制作用逐渐增强;而污染得到控制时,气溶胶对降水的抑制作用有所缓解。同时随着能见度的降低,华山和周围平原站的小雨降水的日数和降水量都减少了,也在一定程度上反映了气溶胶对降水的抑制作用。

基于中国东部严重污染地区的 3 a 气象观测资料、国际卫星云气候学云数据集 (ISCCP) 和基于雨量计的每小时降水数据, Jiang et al. (2016)分析了气溶胶对降水的影响,计算了不同云类型降水的概率随气溶胶含量变化的影响。发现随着气溶胶光学厚度的增加,深对流云产生的降水先增加后减少,减少部分可能是由于气溶胶的辐射效应引起的。随着气溶胶光学厚度的增加,近地面太阳辐射通量减少。太阳辐射的减少导致地面热通量和对流势能减少,这对于对流云和降水的发展是不利的。

Zhu et al. (2015)通过分析中国地区 CloudSat 卫星降雨资料和 MODIS 气溶胶光学厚度资料,发现处于发展阶段的对流云,云滴随高度增大,云滴增长率随气溶胶含量的变化而变化,云滴在清洁条件下比污染条件增长更快。通过分析卫星反演云底温度,确定发生降水的云的云顶和云底温度,预测发生降水的云厚度。通过对比不同气溶胶光学厚度背景

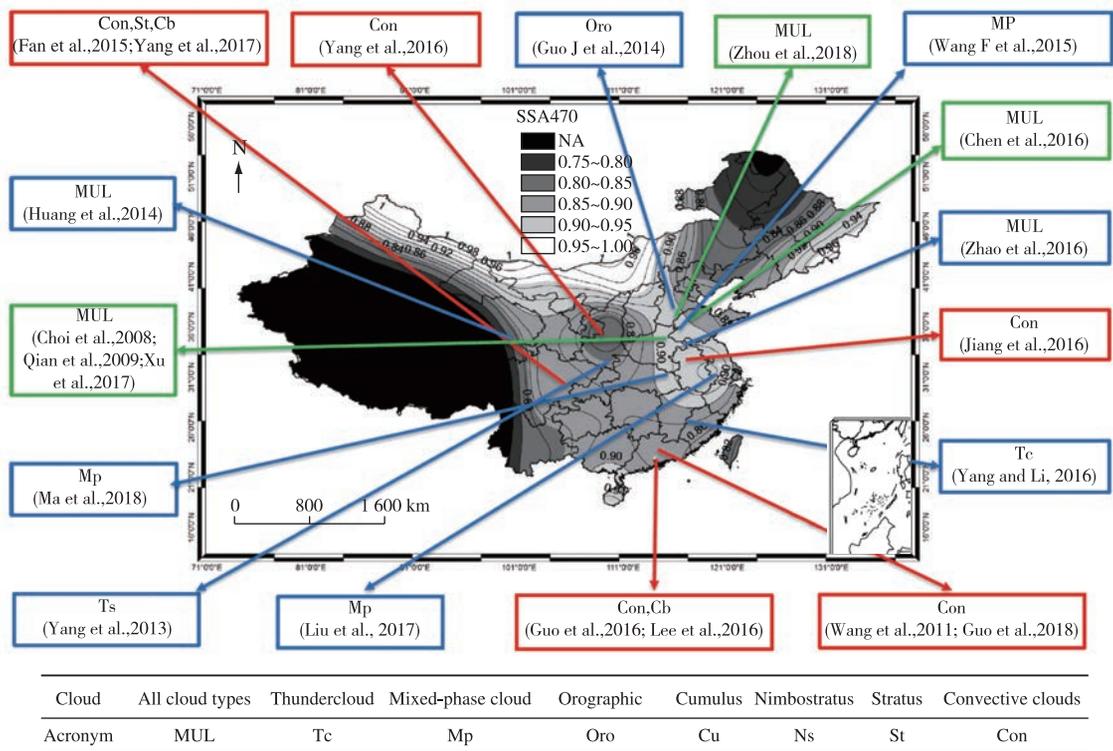


图 8 中国地区气溶胶对云、降水研究地域分布(引自 Lee et al., 2007) (底图颜色代表气溶胶单次散射反射率, 黑色为强吸收; 引自 Li et al., 2019)

Fig.8 Locations of the studies on aerosol-cloud-precipitation-interactions in China (Li et al., 2019). The base map shows the single scattering albedo across China with light and dark colors denote weak and strong absorptions respectively (Lee et al., 2017)

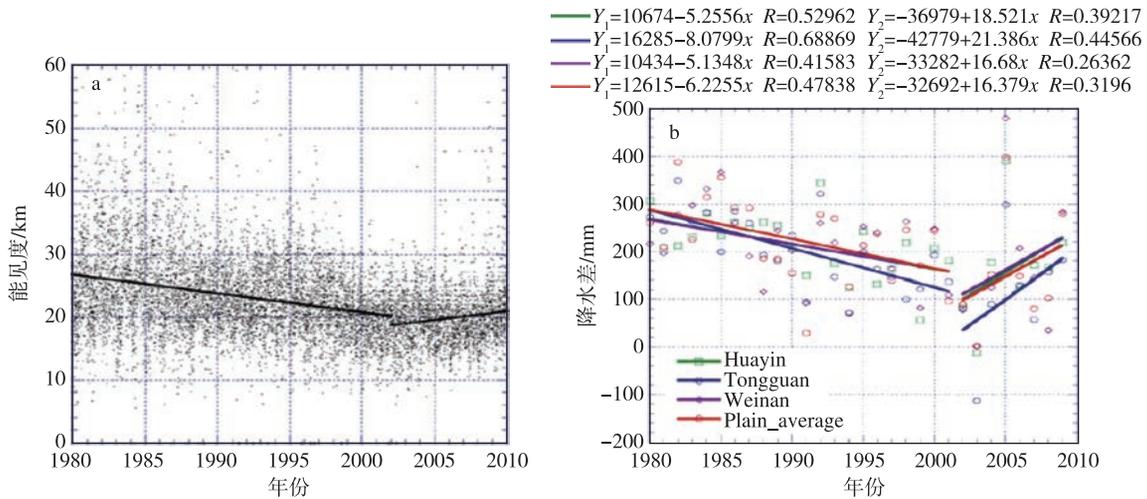


图 9 华山能见度变化趋势(a)及华山降水和周围平原降水的差值变化趋势(b)(引自 Yang et al., 2013b)

Fig.9 (a) The variation trend of visibility in Mount Hua and (b) the variation trend of precipitation difference between Mount Hua and the surrounding plains (from Yang et al., 2013b)

下发生降水的云厚度,发现发生降水的云的最小厚度随气溶胶含量的增加而系统增厚(图 10)。在中国及东南亚区域,气溶胶光学厚度每增加 1 个单位,对流云内形成暖雨的云厚需要增加 5.5 km。在清洁环境下(气溶胶光学厚度小于 0.2),几百米后的

对流云就可能产生降水,但在重污染环境下(气溶胶光学厚度大于 0.5),云厚度要有几公里才可能产生降水(图 9)。这一发现可用于云降水参数化,有利于提高对流云降水预报精度,尤其是夏日的对流性降水。

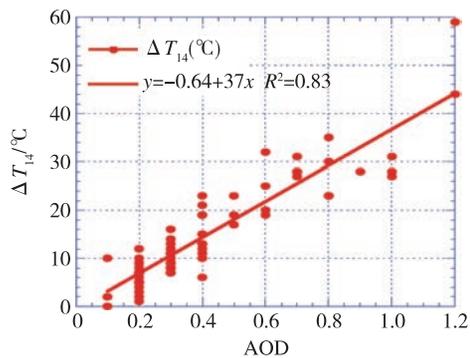


图 10 产生降水的云顶云底温度差(等价云厚度)随气溶胶光学厚度(AOD)变化(引自 Zhu et al., 2015)

Fig.10 Variation of cloud top and bottom temperature difference (equivalent cloud depth) for raining clouds with aerosol optical depth (from Zhu et al., 2015)

3.2 气溶胶对强降水的影响

2013年7月8—9日,四川北川发生多年来最严重的一次强降雨过程。超强降雨冲走了房屋、工厂和桥梁,并引起山体滑坡,造成200人死亡、30万人流离失所。类似极端天气事件在该地区时有发生,对人民生命财产造成严重影响。四川盆地四面环山,污染严重,空气污染在很多方面都会影响降水,影响过程非常复杂,取决于大气状况和气溶胶特征,既可能增强、也可能减弱。通过分析实测资料和模式模拟,Fan et al.(2015)详细研究了空气污染对此次降雨过程的各种可能影响,提出了一个非常重要的影响机制(图11)。该机制可以帮助解释该地区极端降水频发的原因,也为未来预报提供了一个新的途径。

由于气溶胶辐射的效应,气溶胶对整层大气总辐射收支影响并不是特别大,但是对地面和大气的的作用特别大且方向相反。这使得盆地大气变得异常稳定,大气中的大量水汽和湿对流不稳定能量不能在广大的平原地区转换为降水,一旦被大尺度大气系统堆积在盆地上空,因地形抬升影响,积聚的水汽和能量被迅速释放出来,造成异常强烈的降水。气溶胶也可以通过改变云的微物理特性来影响降水。Fan et al.(2015)通过高精度云模式模拟实验发现气溶胶辐射效应占主导地位,可使得降雨增强近一倍,微物理过程影响降雨时空变化,但对本次降雨的总降水量影响不大。该机制如果引入到天气预报模式中,将有可能对污染严重地区的天气预报产生显著影响。这类地区一般人口稠密、工业发达,因此,强

降雨的时空分布和强度预报尤其重要。以往的研究主要关注气溶胶的气候效应,而气溶胶对天气过程也可能有显著影响,目前欧洲中期天气预报中心和美国气象与环境预报中心都正在将气溶胶影响考虑进天气预报模式中。

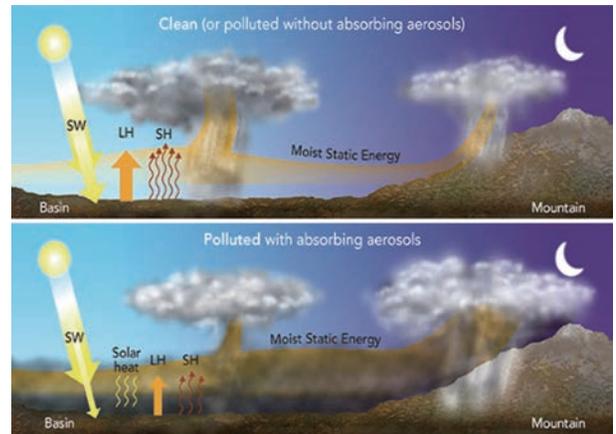


图 11 气溶胶影响山区理论示意:(a)清洁大气;(b)污染大气(干净条件下,平原地面受太阳辐射加热,产生对流,形成降雨;污染情况下,平原的降雨被抑制,但下游山区显著增强;引自 Fan et al., 2015)

Fig.11 The theoretical sketch of aerosol influence on wind in the mountain area for: (a) clean air; (b) polluted air (under clean condition, the surface of the plain is heated by solar radiation, producing convection and forming rainfall; under polluted condition, the rainfall of the plain is restrained, yet the downstream mountain area is significantly enhanced; from Fan et al., 2015)

气溶胶不仅影响降水强度和空间分布,也在不同时间尺度上影响强降雨,如日变化、周变化直到年际变化。利用2007—2012年中国珠江三角洲地区加密站点观测逐小时的地面气溶胶颗粒物(直径小于 $10\ \mu\text{m}$)的质量浓度(PM_{10})、闪电、 SO_2 、 NO_2 、降水等数据,Guo et al.(2016)分析发现两者的日变化强度和频次峰值时刻,常出现在午后到傍晚时段(图12),而当到达降水日变化峰值前,气溶胶有抑制降水的趋势;峰值后,气溶胶有促进降水的趋势。Lee et al.(2016)利用WRF数值模式模拟发现在气溶胶污染条件下,模式可以很好地再现降水日变化特征;而在清洁条件下,降水明显提前。这表明气溶胶有推迟和增强降水的作用。同时,通过关闭模式的直接辐射效应模块,降水也会显著提前,表明气溶胶辐射效应在气溶胶推迟降水过程中发挥了不可忽视的作用。模式模拟从机制上印证了气溶胶等大气

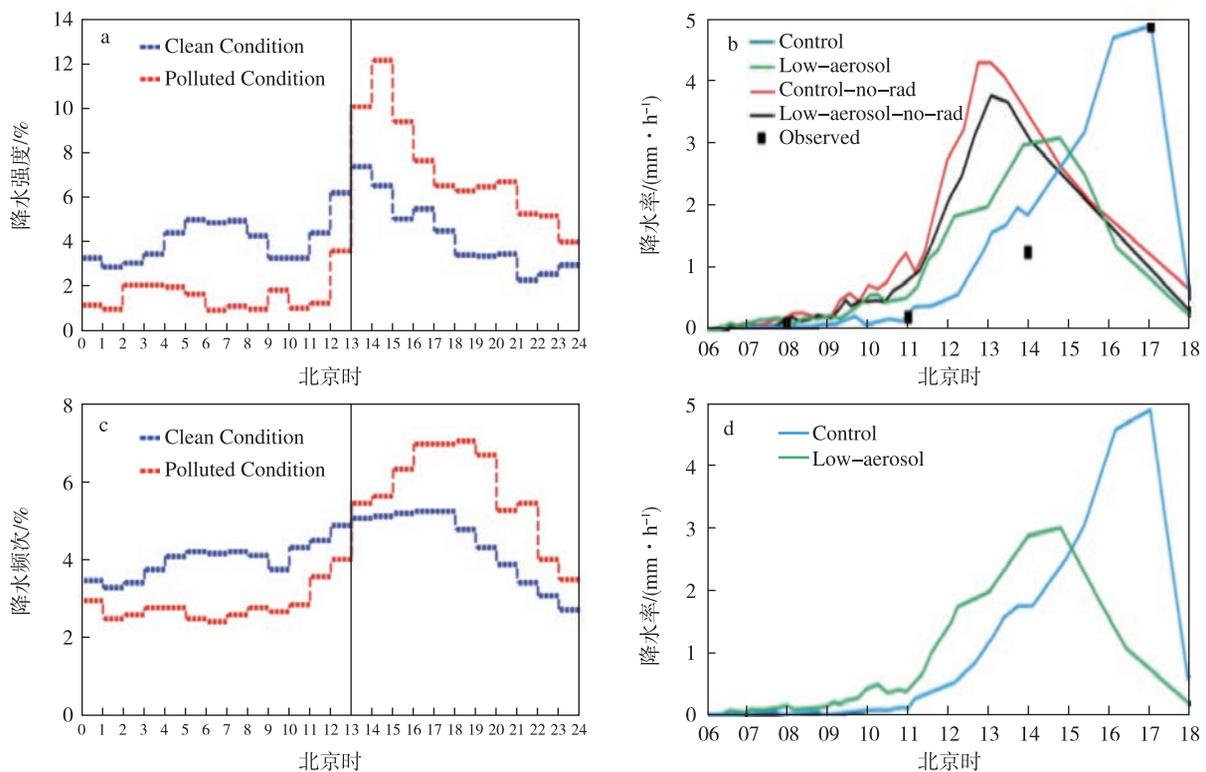


图 12 观测与模拟的降水日变化与地面污染浓度的关系:(a、c)观测结果(引自 Guo et al., 2016);(b、d)模式模拟结果(引自 Lee et al., 2016)

Fig.12 Relationship between the observed and simulated daily variation of precipitation and the ground pollution concentration: (a, c) observation results(from Guo et al., 2016); (b, d) model simulation results(from Lee et al., 2016)

污染物推迟午后降水的观测证据(Lee et al., 2016)。

4 气溶胶对雷暴的影响

由于气溶胶的辐射效应,吸收性气溶胶抑制雷暴,而吸湿性气溶胶在适当的环境条件下由于冰云激发效应增强雷暴。云滴开始主要以凝结增长为主,气溶胶抑制了碰并过程,使云的生命周期延长,更多过冷水可以被输送到高层;冻结释放更多潜热,增强浮力,促进对流发展,使得混合云增厚,更利于起电,形成闪电。因此闪电与对流强度和云微物理特性关系很大(William and Stanfill, 2002)。人们早就注意到,大陆和海洋之间闪电发生频率有显著差异,海陆闪电密度相差近一个量级。在热带地区,南北纬 30° 地区发生了全球大约 78% 的闪电,年平均闪电频率在海洋和陆地上分别为 5 fl/s 和 31~49 fl/s,这归因于它们的热力(地面状况)和大气环境(气溶胶)差异。陆地感热通量、雷暴宽度、上升速度都比海洋上大,这种差异使得大陆性对流中非传导起电更容易出现(Stolz et al., 2015)。气溶胶对雷暴也有重要影响,影响取决于气溶胶类型和天气。

Wang et al. (2011) 对珠江三角洲(PRD)地区的

降水,能见度和闪电的长期测量进行了分析,研究重点是广州大城市地区。分析了 2000—2006 年该地区的降水,雷电和能见度,用资料和模式评估了气溶胶对云、降水和闪电过程的影响。研究表明,珠三角地区的大雨和闪电与能见度呈反相关,相关系数分别为 -0.739 和 -0.506。结果表明,珠三角地区较大的闪电密度和大量的降雨可能与大气中的气溶胶负荷有关,局部人为污染导致极端天气事件的发生,包括闪电和大雨(图 13)。

利用 1983—2005 年能见度和雷暴数据, Yang et al. (2016) 研究了夏季中国中部(关中平原)和东部地区不同类型的气溶胶对对流和雷暴活动的可能影响。研究发现这两个地区的能见度具有类似的一周准周期:工作日低于周末。除了每周可能的“自然”变化外,周五至下周周一能见度最好,而周中的能见度最差,这显示人类活动对大气污染排放的贡献在不同地区是类似的。两个区域的雷暴也显示出明显的周期,但峰值的出现时间却是完全不同,这些周期差异与气溶胶类型相关。在中国中部,周六到周一的雷暴发生频率高于其他时段,该地区气溶胶吸收强,出现在工作日较多的气溶胶可抑制对流活

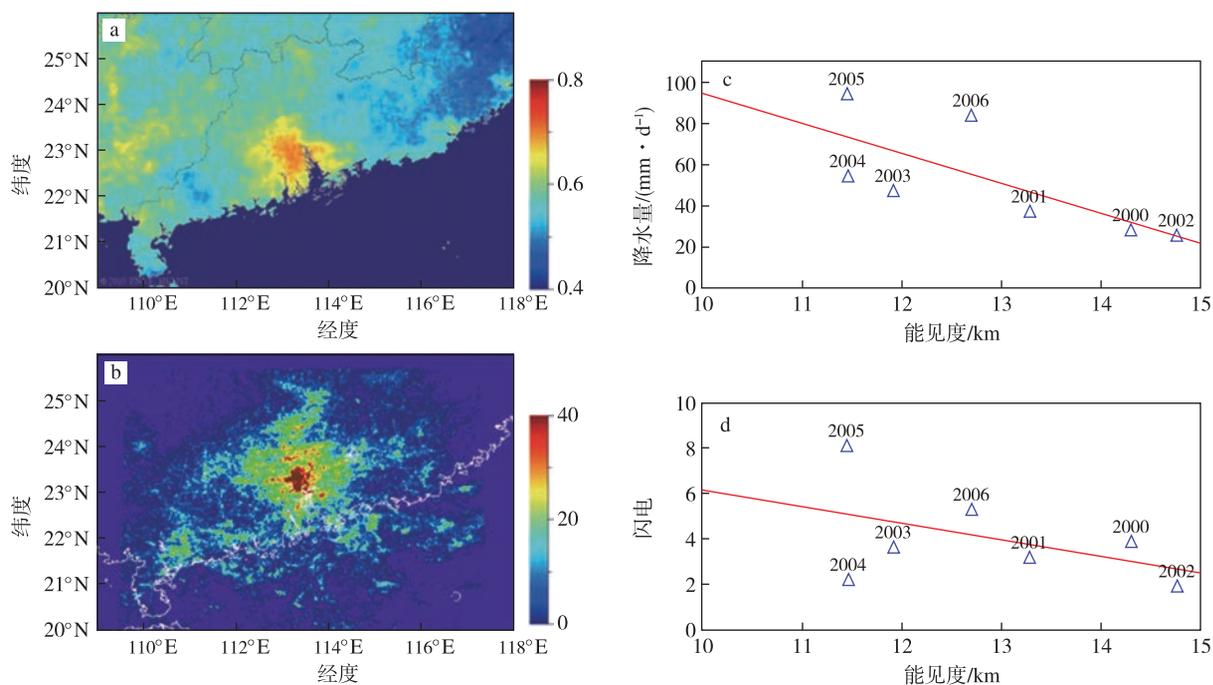


图 13 2005 年广州及其周边地区 MODIS 气溶胶光学厚度 (a), 闪电 (b; 单位: $\text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 以及同地区强降雨和闪电与能见度相关关系 (c, d) (引自 Wang et al., 2011)

Fig. 13 (a) MODIS aerosol optical depth and (b) lightning in Guangzhou and its surrounding areas in 2005 and (c, d) correlation between the heavy rainfall and lightning and the visibility in the same region (from Wang et al., 2011)

动。而在中国东南地区, 气溶胶吸收弱, 吸湿强, 这有助于强化对流运动, 使得雷暴和强对流天气过程更容易在周中发生 (周末较少) (图 14)。

上述两个地区雷暴长期变化趋势也相反。在吸收性气溶胶含量高的关中平原地区, 近 50 a 来大气气溶胶含量也有显著的上升趋势, 但同时期该地区的雷暴数量有明显的下降趋势。从 20 世纪 60 年代到 20 世纪末, 雷暴次数减少了约一半, 下午雷暴减少显著, 上午雷暴减少不明显, 这说明雷暴减少的主要原因不是气候变化引起的, 而是与气溶胶辐射效应有关。在过去的半个世纪中, 该地区雷暴的发生减少了 50% (Yang et al., 2013b, 2016)。因气溶胶的弱吸收和强亲水特性, 中国东南部地区出现了增长趋势 (Yang and Li, 2014)。

气溶胶对闪电活动的这种促进作用存在一个阈值, 超过阈值后, 冰晶会推迟到很高很冷的区域, 会不利产生闪电。通过研究非洲大陆闪电, Wang et al. (2018) 发现阈值与气溶胶和大气热力和水分条件都息息相关, 且在阈值前后闪电对气溶胶变化的反应非常不一样 (图 15)。阈值前, 随气溶胶增加, 不管沙尘区 (北非) 和烟尘区 (中非) 气溶胶, 雷暴都随气溶胶含量增加而增多。当到达阈值后, 沙尘区 (干燥) 雷暴随气溶胶含量增加而减少, 但烟尘区

(湿润) 雷暴随气溶胶含量增加而不存在明显变化。随气溶胶增加, 两类气溶胶辐射作用都对对流和闪电有抑制作用, 但后者由于大气湿不稳定较强抵消了部分抑制作用。

5 气溶胶对边界层和空气污染的可能影响

气溶胶与边界层存在较强的相互作用, 并在相当程度上影响地面污染 (Li et al., 2017c)。气溶胶可以通过散射和吸收太阳辐射造成地表冷却, 从而减少驱动 PBL 发展的感热通量。与此同时, 被气溶胶吸收的太阳辐射被用于加热大气, 从而加强边界层顶逆温。虽然气溶胶对整个地-气系统辐射能量平衡的扰动较小, 但是由于其冷却地面的同时可加热大气, 从而在大气内部和地面引起截然相反的温度变化, 造成大气变得异常稳定 (Wang et al., 2013)。大气稳定度的增加导致 PBL 内湍流减弱, 自由对流层通过夹卷进入 PBL 的干空气减少, PBL 内水汽增多, 两者的综合作用使相对湿度 (RH) 上升。升高的 RH 更有利于气溶胶的吸湿增长和二次气溶胶的形成, 前者将增强气溶胶对太阳辐射的散射能力, 而后者可能增强黑碳气溶胶的吸收能力, 从而导致 PBLH 进一步下降, 形成更有利于大气污染

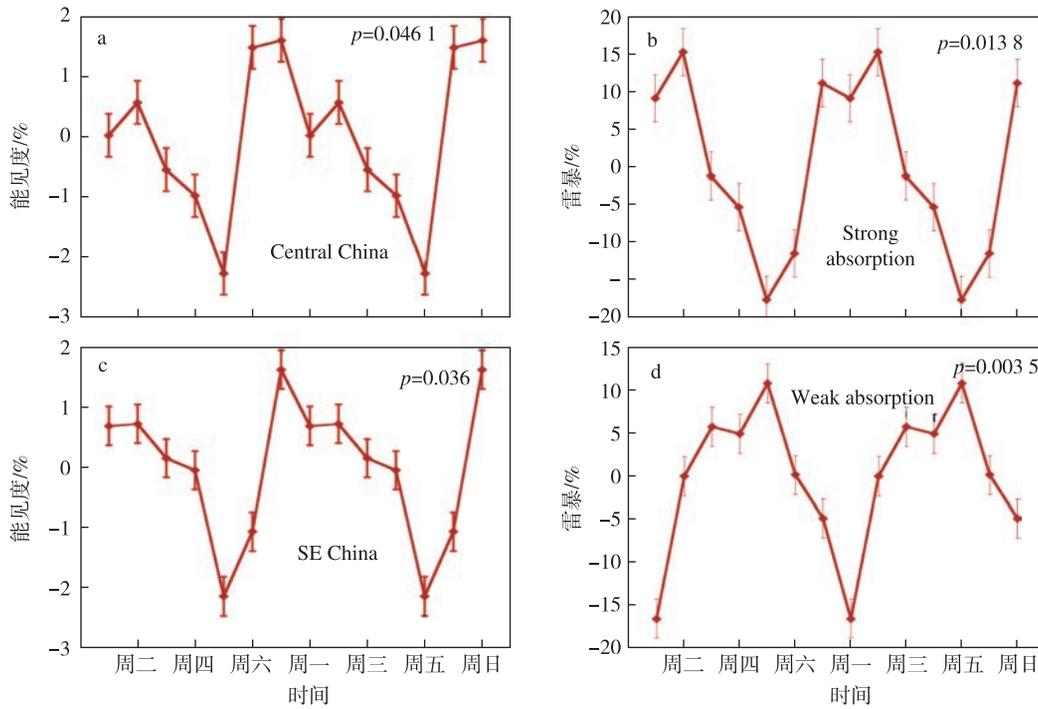


图 14 能见度(a,c)与雷暴(b,d)发生概率的周变化:(a,b)关中平原;(c,d)长三角(引自 Yang et al.,2016)
Fig.14 The probability of weekly variation of (a,c) visibility and (b,d) thunderstorm : (a,b) Guanzhong Plain ; (c,d) Yangtze River Delta(from Yang et al.,2016)

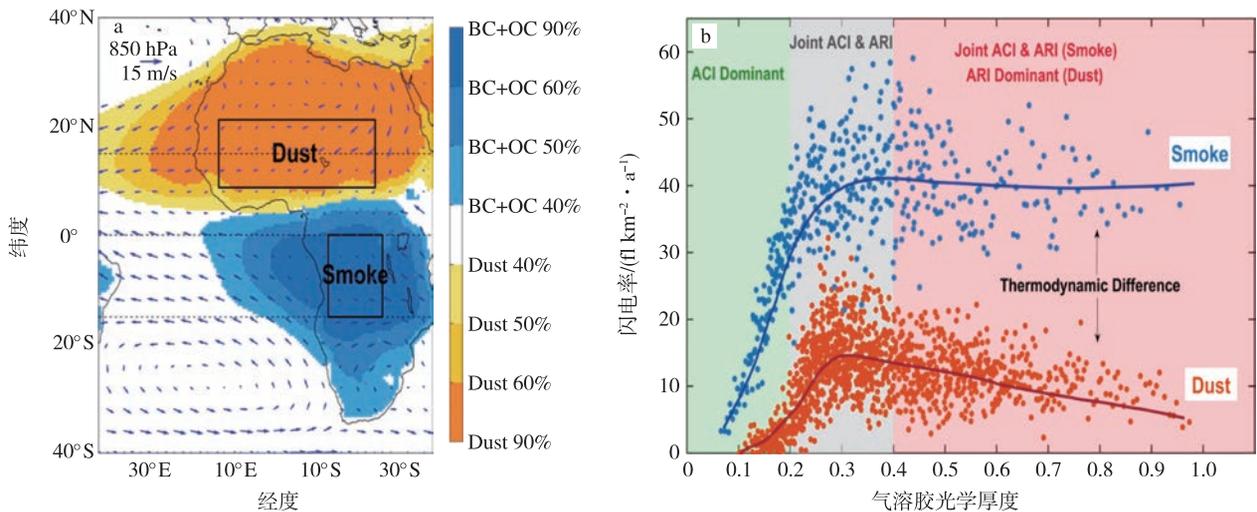


图 15 非洲沙尘和烟尘气溶胶对闪电的影响(b中3个区域分别代表气溶胶辐射效应、云微物理效应以及它们的联合效应;引自 Wang et al.,2018)
Fig.15 Effects of dust and smoke aerosols on lightnings in Africa(the three regions in Fig.b respectively represent aerosol radiation effect,cloud microphysical effect and their combined effects;from Wang et al.,2018)

物积聚的浅薄 PBL (Ding et al.,2016),这个模式发现与中美类似气候条件下边界层高度的系统差异(一倍多)相一致(图 16;Li et al.,2017c)。

边界层与气溶胶间的相互作用对地面大气污染发展过程具有重要影响。利用 WRF-Chem 等大气化学模式开展的模拟研究,大部分表明气溶胶可以通过吸收、散射太阳辐射,而抑制 PBL 发展并加剧

地面大气污染(Ding et al.,2016)。但这些模拟研究主要针对短期的极端污染事件,对气溶胶-PBLH 可能存在的长期相互作用的研究较少。Dong et al.(2017)利用 2 a 的 MPL 数据、13 a(2002—2014 年)的 MODIS AOD 数据以及 35 a(1980—2014 年)的能见度数据,分析了关中地区气溶胶与边界层的长期相互作用,发现该地区大量存在的吸收性气溶胶

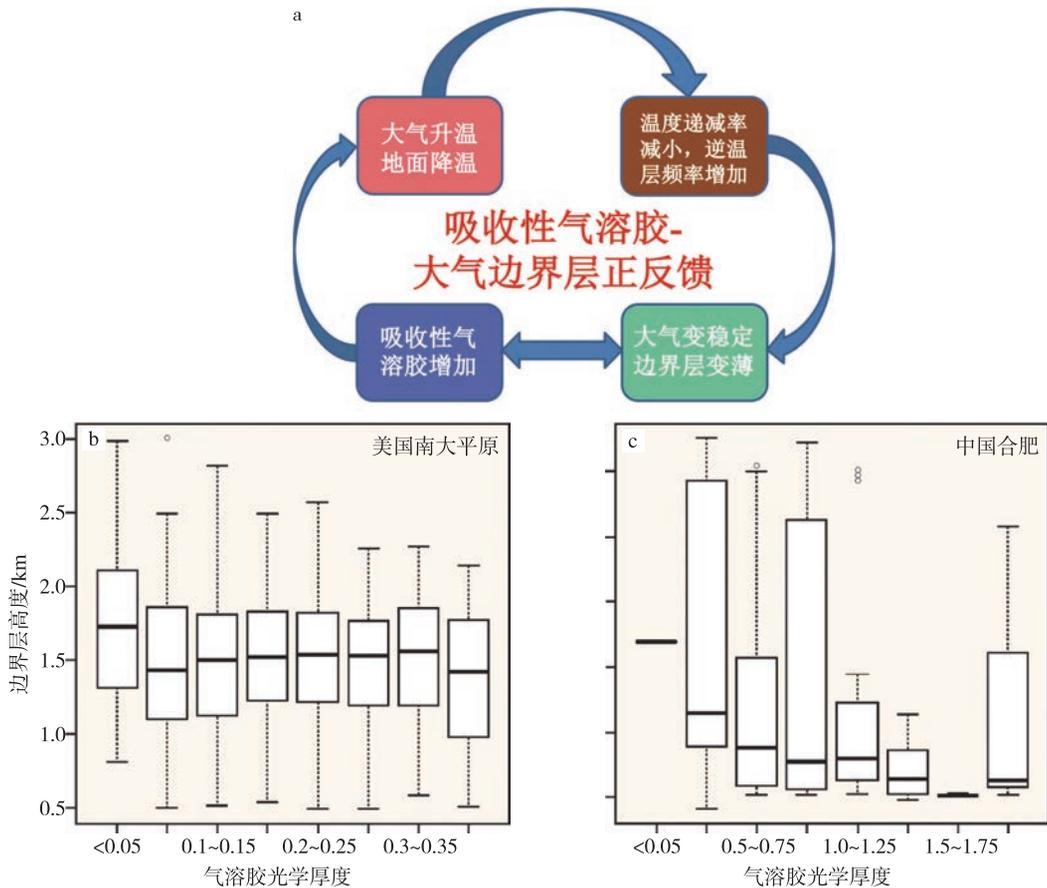


图 16 气溶胶-边界层通过影响温度和大气稳定度相互作用机理 (a); 美国南大平原 (b) 和中国合肥 (c) 类似气候带常年平均边界层高度和气溶胶光学厚度比较 (引自 Li et al., 2017c)。

Fig. 16 (a) The schematic of absorbing aerosol and PBL interactions (upper panel), and the comparison of PBL height between (b) the South Great Plains in US and (c) Hefei in China of similar climate (lower panels) (from Li et al., 2017c)

使到达地面的太阳辐射显著减少,同时对边界层上部大气加热作用明显,导致边界层逆温增强、边界层高度下降,造成关中地区不同海拔高度上气溶胶浓度长期相反的变化趋势。将这一研究扩展到全国范围内,发现近 13 a 来北方地区近地面污染加重、高空污染减轻,而这一现象在南方地区不明显,表明气溶胶-边界层反馈作用在气溶胶吸收性强的地区对大气污染的影响更为显著。大气污染和边界层高度间的正反馈效应,可能是除了新粒子形成之外引发中国严重霾事件形成的另一个主要因素,也可以部分解释中国大力减排措施仍会经常发生污染的一个重要原因 (Li et al., 2017a; Dong et al., 2017; Su et al., 2018, 2020)。

6 结论与讨论

空气污染、气候与公众生活息息相关。随着物质生活条件的大幅改善,人们对两者越来越关注。从环境和气候变化的核心问题—数十年的快速发展

引起的环境变化 (尤其是气溶胶的变化) 对中国天气和气候有何影响以及影响的物理机制等,较全面、系统地综述了气溶胶对多个气象参数的可能影响。

气溶胶-辐射-云-降水及其相互作用以及相关联系的雷暴、边界层等问题是论述的重点。它们之间存在着错综复杂的联系,并且受到地球气候系统中各物理过程和机制的影响,迄今为止成为气候模型中最不确定的要素。气溶胶有关研究也是当今大气科学领域最活跃、发展最为迅速的。中国近年来的相关研究也取得了许多重大突破,有多种创新方法把气溶胶影响从错综复杂的各种影响中分离出来,在不同程度解释:1) 1960—1990 年代我国东部快速发达地区的降温趋势 (其他地区升温); 2) 大部分地区出现小雨减小、强降雨增加趋势; 3) 中西部雷暴减小且易发生周日和周一 (黑炭气溶胶为主), 东南地区雷暴增加且易发生在周四、周五 (酸性气溶胶为主); 4) 华南地区午后强降雨发生时间推迟但强度增加; 5) 关中平原雾霾的增加与边界层高度变化的

关系以及中美类似气候区边界层平均高度的差异等。这些研究结果对了解气候变化成因、提高天气预报准确度和科学治理雾霾都具有指导意义。同时也促进了气溶胶-季风相互作用这一研究方向的快速发展。

气溶胶可以作为云的凝结核改变云的微物理特征来影响云和降水,从而进一步影响强对流活动的发生频率及发展强度。气溶胶作为云凝结核,过多气溶胶使得云滴变小,不利于降水发生。气溶胶可通过改变云滴和冰晶的数量、相态和大小改变云微物理特征,进而影响雷暴的冰相过程。近年来,研究发现气溶胶能够使对流性混合云发展的更加旺盛,产生更多的降水。极端天气事件主要受大气动力和热力学条件的驱动,气溶胶可以通过调节大气的热力学状态来影响极端天气事件。由于风暴对大气热力和动力的任何微小变化都比较敏感,气溶胶可影响极端天气发生强度和持续时间。研究气溶胶对强对流活动的热力、动力、微物理影响机制,对揭示强对流系统的发生发展机制、并因此提高极端天气预警和预报能力也有帮助。

除了污染物排放,边界层高度是地面灰霾污染

物浓度的影响因子,气溶胶-辐射相互作用可降低边界层高度,进而影响地面雾霾浓度。植物、化石燃料燃烧产生的黑炭气溶胶对太阳辐射有很强的吸收性,可引起大气增温、地面降温、大气稳定度增加,反过来又不利于污染物排放。集聚的黑炭粒子可进一步增加大气温度,使大气更加稳定,加剧空气污染,如此形成恶性循环就产生了重度灰霾天。这可以在一定程度上解释为何尽管目前采取一系列减排措施,但雾霾仍时常发生。

致谢:本文所述研究有不少来自作者在美国马里兰大学和北京师范大学的研究团队(如 Li C, Liu J, Su T, Yan H, Jiang M, Chen T, Liu L, Lyu M, Zhu Y, Wan Q, Dong Z)以及其他合作者(如 Rosenfeld D, Fan J, 郭建平等)。研究承蒙中美多个机构支持,蒋梦娇帮助认真审阅全文,在此一并感谢!

献给母校南京信息工程大学“60华诞”的一份薄礼,并借此良机衷心感谢母校众多老师在本人在校攻读学士和硕士学位期间给予了良好教育,尤其是硕士生导师翁笃鸣教授。

预祝母校百尺竿头,更进一步!

参考文献 (References)

- Ackerman A S, Toon O B, Taylor J P, et al., 2000. Effects of aerosols on cloud albedo: evaluation of Twomey's parameterization of cloud susceptibility using measurements of ship tracks[J]. *J Atmos Sci*, 57(16): 2684-2695.
- Aitken J, 1882. On dust, fogs, and clouds[J]. *Proc R Soc Edinb*, 11: 122-126.
- Chen Q, Fan J W, Hagos S, et al., 2015. Roles of wind shear at different vertical levels: cloud system organization and properties[J]. *J Geophys Res Atmos*, 120(13): 6551-6574.
- Chen T M, Guo J P, Li Z Q, et al., 2016. A CloudSat perspective on the cloud climatology and its association with aerosol perturbations in the vertical over Eastern China[J]. *J Atmos Sci*, 73(9): 3599-3616.
- Ding A J, Huang X, Nie W, et al., 2016. Enhanced haze pollution by black carbon in megacities in China[J]. *Geophys Res Lett*, 43(6): 2873-2879.
- Dong Z P, Li Z Q, Yu X, et al., 2017. Opposite long-term trends in aerosols between low and high altitudes: a testimony to the aerosol-PBL feedback[J]. *Atmos Chem Phys*, 17(12): 7997-8009.
- Fan J, Leung L R, Rosenfeld D, et al., 2013. Microphysical effects determine macrophysical response for aerosol impacts on deep convective clouds[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 110(48): E4581-E4590.
- Fan J W, Rosenfeld D, Yang Y, et al., 2015. Substantial contribution of anthropogenic air pollution to catastrophic floods in Southwest China[J]. *Geophys Res Lett*, 42(14): 6066-6075.
- Fan J W, Wang Y, Rosenfeld D, et al., 2016. Review of aerosol-cloud interactions: mechanisms, significance, and challenges[J]. *J Atmos Sci*, 73(11): 4221-4252.
- Fan J W, Rosenfeld D, Zhang Y W, et al., 2018. Substantial convection and precipitation enhancements by ultrafine aerosol particles[J]. *Science*, 359(6374): 411-418.
- Feingold G, Eberhard W L, Veron D E, et al., 2003. First measurements of the Twomey indirect effect using ground-based remote sensors[J]. *Geophys Res Lett*, 30(6): 20-21.
- Guo J P, Deng M J, Fan J W, et al., 2014. Precipitation and air pollution at mountain and plain stations in northern China: insights gained from observations and modeling[J]. *J Geophys Res Atmos*, 119(8): 4793-4807.
- Guo J P, Deng M J, Lee S, et al., 2016. Delaying precipitation and lightning by air pollution over the Pearl River Delta. Part I: observational analyses[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 121(11): 6472-6488.
- Guo J P, Su T N, Li Z Q, et al., 2017. Declining frequency of summertime local-scale precipitation over eastern China from 1970 to 2010 and its potential link to aerosols[J]. *Geophys Res Lett*, 44(11): 5700-5708.
- Guo J P, Liu H, Li Z Q, et al., 2018. Aerosol-induced changes in the vertical structure of precipitation: a perspective of TRMM precipitation radar[J]. *Atmos Chem Phys*, 18(18): 13329-13343.

- Guo J P, Su T N, Chen D D, et al., 2019. Declining summertime local-scale precipitation frequency over China and the United States, 1981—2012: the disparate roles of aerosols[J]. *Geophys Res Lett*, 46(22): 13281-13289.
- Huang J F, Guo J P, Wang F, et al., 2015. CALIPSO inferred most probable heights of global dust and smoke layers[J]. *J Geophys Res Atmos*, 120(10): 5085-5100.
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013-The Physical Science Basis*[M]. Intergovernmental Panel on Climate Change, 1535.
- Jiang M J, Li Z Q, Wan B C, et al., 2016. Impact of aerosols on precipitation from deep convective clouds in eastern China[J]. *J Geophys Res Atmos*, 121(16): 9607-9620.
- Jiang M J, Feng J Q, Li Z Q, et al., 2017. Potential influences of neglecting aerosol effects on the NCEP GFS precipitation forecast[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(22): 13967-13982.
- Kim B G, Miller M A, Schwartz S E, et al., 2008. The role of adiabaticity in the aerosol first indirect effect[J]. *J Geophys Res*, 113(D5). doi: 10.1029/2007jd008961.
- Koren I, 2004. Measurement of the effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation[J]. *Science*, 303(5662): 1342-1345.
- Koren I, Kaufman Y J, Rosenfeld D, et al., 2005. Aerosol invigoration and restructuring of Atlantic convective clouds[J]. *Geophys Res Lett*, 32(14): 828. doi: 10.1029/2005gl023187.
- Koren I, Martins J V, Remer L A, et al., 2008. Smoke invigoration versus inhibition of clouds over the Amazon[J]. *Science*, 321(5891): 946-949.
- Köhler H, 1936. The nucleus in and the growth of hygroscopic droplets[J]. *Trans Faraday Soc*, 32: 1152-1161.
- Lee K H, Li Z Q, Wong M S, et al., 2007. Aerosol single scattering albedo estimated across China from a combination of ground and satellite measurements[J]. *J Geophys Res*, 112(D22): D22S15.
- Lee S S, Guo J P, Li Z Q, 2016. Delaying precipitation by air pollution over the Pearl River Delta; 2. Model simulations[J]. *J Geophys Res Atmos*, 121(19): 11739-11760.
- Li C, McLinden C, Fioletov V, et al., 2017a. India is overtaking China as the world's largest emitter of anthropogenic sulfur dioxide[J]. *Sci Rep*, 7: 14304.
- Li Z Q, 1998. Influence of absorbing aerosols on the inference of solar surface radiation budget and cloud absorption[J]. *J Climate*, 11(1): 5-17.
- Li Z Q, 2020. Intensified investigations of East Asian aerosols and climate[J]. *Eos*. doi: 10.1029/2020eo140980.
- Li Z Q, Barker H W, Moreau L, 1995. The variable effect of clouds on atmospheric absorption of solar radiation[J]. *Nature*, 376(6540): 486-490.
- Li Z Q, Moreau L, Arking A, 1997. On solar energy disposition: a perspective from observation and modeling[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 78(1): 53-70.
- Li Z Q, Xia X G, Cribb M, et al., 2007. Aerosol optical properties and their radiative effects in northern China[J]. *J Geophys Res*, 112(D22): D22S01.
- Li Z Q, Lee K H, Wang Y S, et al., 2010. First observation-based estimates of cloud-free aerosol radiative forcing across China[J]. *J Geophys Res*, 115: D00K18.
- Li Z Q, Niu F, Fan J W, et al., 2011. Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation[J]. *Nature Geosci*, 4(12): 888-894.
- Li Z Q, Lau W K M, Ramanathan V, et al., 2016. Aerosol and monsoon climate interactions over Asia[J]. *Rev Geophys*, 54(4): 866-929.
- Li Z Q, Rosenfeld D, Fan J, 2017b. Aerosols and their impact on radiation, clouds, precipitation, and severe weather events[J]. *Oxford Research Encyclopedias*, doi: 10.1093/acrefore/9780199389414.013.126.
- Li Z Q, Guo J P, Ding A J, et al., 2017c. Aerosol and boundary-layer interactions and impact on air quality[J]. *Natl Sci Rev*, 4(6): 810-833.
- Li Z Q, Wang Y, Guo J P, et al., 2019. East Asian study of tropospheric aerosols and their impact on regional clouds, precipitation, and climate (EAST-AIR CPC)[J]. *J Geophys Res Atmos*, 124(23): 13026-13054.
- Liu J J, Li Z Q, 2018a. Significant underestimation in the optically based estimation of the aerosol first indirect effect induced by the aerosol swelling effect[J]. *Geophys Res Lett*, 45(11): 5690-5699.
- Liu J J, Li Z Q, 2018b. First surface-based estimation of the aerosol indirect effect over a site in southeastern China[J]. *Adv Atmos Sci*, 35(2): 169-181.
- Liu J J, Li Z Q, 2019. Aerosol properties and their influences on low warm clouds during the Two-Column Aerosol Project[J]. *Atmos Chem Phys*, 19(14): 9515-9529.
- Liu J J, Li Z Q, Cribb M, 2016a. Response of marine boundary layer cloud properties to aerosol perturbations associated with meteorological conditions from the 19-month AMF-Azores campaign[J]. *J Atmos Sci*, 73(11): 4253-4268.
- Liu L, Li Z Q, Yang X, et al., 2016b. The long-term trend in the diurnal temperature range over Asia and its natural and anthropogenic causes[J]. *J Geophys Res Atmos*, 121(7): 3519-3533.
- Liu Y Q, de Leeuw G, Kerminen V M, et al., 2017. Analysis of aerosol effects on warm clouds over the Yangtze River Delta from multi-sensor satellite observations[J]. *Atmos Chem Phys*, 17(9): 5623-5641.
- Luo Y F, Lu D R, Zhou X J, et al., 2001. Characteristics of the spatial distribution and yearly variation of aerosol optical depth over China in last 30 years[J]. *J Geophys Res*, 106(D13): 14501-14513.
- Menon S, 2002. Climate effects of black carbon aerosols in China and India[J]. *Science*, 297(5590): 2250-2253.
- Mitchell J F B, Johns T C, Gregory J M, et al., 1995. Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulphate aerosols[J]. *Nature*, 376(6540): 501-504.
- Niu F, Li Z Q, Li C, et al., 2010. Increase of wintertime fog in China: potential impacts of weakening of the eastern Asian monsoon circulation and increasing aerosol loading[J]. *J Geophys Res*, 115: D00K20.
- Pinto I R C A, Pinto O Jr, Gomes M A S S, et al., 2004. Urban effect on the characteristics of cloud-to-ground lightning over Belo Horizonte-Brazil[J].

- Ann Geophys, 22(2): 697-700.
- Proestakis E, Kazadzis S, Lagouvardos K, et al., 2016. Lightning activity and aerosols in the Mediterranean region [J]. Atmos Res, 170: 66-75.
- Qian Y, Kaiser D P, Leung L R, et al., 2006. More frequent cloud-free sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000 [J]. Geophys Res Lett, 33(1). doi: 10. 1029/2005gl024586.
- Qian Y, Gong D Y, Fan J W, et al., 2009. Heavy pollution suppresses light rain in China: observations and modeling [J]. J Geophys Res, 114: D00K02.
- Rosenfeld D, Feingold G, 2003. Explanation of discrepancies among satellite observations of the aerosol indirect effects [J]. Geophys Res Lett, 30(14). DOI: 10. 1029/2003gl017684.
- Rosenfeld D, Dai J, Yu X, et al., 2007. Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation [J]. Science, 315(5817): 1396-1398.
- Rosenfeld D, Lohmann U, Raga G B, et al., 2008. Flood or drought: how do aerosols affect precipitation? [J]. Science, 321(5894): 1309-1313.
- Shi G Y, Hayasaka T, Ohmura A, et al., 2008. Data quality assessment and the long-term trend of ground solar radiation in China [J]. J Appl Meteor Climatol, 47(4): 1006-1016.
- Stolz D C, Rutledge S A, Pierce J R, 2015. Simultaneous influences of thermodynamics and aerosols on deep convection and lightning in the tropics [J]. J Geophys Res Atmos, 120(12): 6207-6231.
- Su T N, Li Z Q, Kahn R, 2018. Relationships between the planetary boundary layer height and surface pollutants derived from lidar observations over China: regional pattern and influencing factors [J]. Atmos Chem Phys, 18(21): 15921-15935.
- Su T N, Li Z Q, Li C, et al., 2020. The significant impact of aerosols vertical structure on low-atmosphere stability and its critical role in aerosol-PBL interaction [J]. Atmospheric Chemistry and Physics (in press)
- Tan Y B, Peng L, Shi Z, et al., 2016. Lightning flash density in relation to aerosol over Nanjing (China) [J]. Atmos Res, 174/175: 1-8.
- Tang J P, Wang P C, Mickley L J, et al., 2014. Positive relationship between liquid cloud droplet effective radius and aerosol optical depth over eastern China from satellite data [J]. Atmos Environ, 84: 244-253.
- Tao W K, Chen J P, Li Z Q, et al., 2012. Impact of aerosols on convective clouds and precipitation [J]. Rev Geophys, doi: 10. 1029/2011rg000369.
- Twomey S, 1974. Pollution and the planetary albedo [J]. Atmos Environ 1967, 8(12): 1251-1256.
- Thornton J A, Virts K S, Holzworth R H, et al., 2017. Lightning enhancement over major oceanic shipping lanes [J]. Geophys Res Lett, 44(17): 9102-9111.
- Wang F, Guo J P, Wu Y R, et al., 2014. Satellite observed aerosol-induced variability in warm cloud properties under different meteorological conditions over Eastern China [J]. Atmos Environ, 84: 122-132.
- Wang F, Guo J P, Zhang J H, et al., 2015. Multi-sensor quantification of aerosol-induced variability in warm clouds over eastern China [J]. Atmos Environ, 113: 1-9.
- Wang Q Q, Li Z Q, Guo J P, et al., 2018. The climate impact of aerosols on the lightning flash rate: is it detectable from long-term measurements? [J]. Atmos Chem Phys, 18(17): 12797-12816.
- Wang Y, Wan Q, Meng W, et al., 2011. Long-term impacts of aerosols on precipitation and lightning over the Pearl River Delta megacity area in China [J]. Atmos Chem Phys, 11(23): 12421-12436.
- Wang Y, Khalizov A, Levy M, et al., 2013. New Directions: light absorbing aerosols and their atmospheric impacts [J]. Atmos Environ, 81: 713-715.
- Williams E, Stanfill S, 2002. The physical origin of the land-ocean contrast in lightning activity [J]. Comptes Rendus Physique, 3(10): 1277-1292.
- Wu G X, Li Z Q, Fu C B, et al., 2016. Advances in studying interactions between aerosols and monsoon in China [J]. Sci China Earth Sci, 59(1): 1-16.
- Yan H R, Li Z Q, Huang J P, et al., 2014. Long-term aerosol-mediated changes in cloud radiative forcing of deep clouds at the top and bottom of the atmosphere over the southern Great Plains [J]. Atmos Chem Phys, 14(14): 7113-7124.
- Yang X, Li Z Q, 2014. Increases in thunderstorm activity and relationships with air pollution in Southeast China [J]. J Geophys Res Atmos, 119(4): 1835-1844.
- Yang X, Ferrat M, Li Z Q, 2013a. New evidence of orographic precipitation suppression by aerosols in central China [J]. Meteorol Atmos Phys, 119(1/2): 17-29.
- Yang X, Yao Z Y, Li Z Q, et al., 2013b. Heavy air pollution suppresses summer thunderstorms in central China [J]. J Atmos Sol-Terr Phys, 95/96: 28-40.
- Yang X, Zhao C F, Zhou L J, et al., 2016. Distinct impact of different types of aerosols on surface solar radiation in China [J]. J Geophys Res Atmos, 121(11): 6459-6471.
- Yuan T, Remer L A, Pickering K E, et al., 2011. Observational evidence of aerosol enhancement of lightning activity and convective invigoration [J]. Geophysical Research Letters, 38: L04701.
- Yuan T L, Li Z Q, Zhang R Y, et al., 2008. Increase of cloud droplet size with aerosol optical depth: an observation and modeling study [J]. J Geophys Res, 113(D4): D04201.
- Zhang Q, Zheng Y X, Tong D, et al., 2019. Drivers of improved PM_{2.5} air quality in China from 2013 to 2017 [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 116(49): 24463-24469.
- Zhu Y N, Rosenfeld D, Yu X, et al., 2015. Separating aerosol microphysical effects and satellite measurement artifacts of the relationships between warm rain onset height and aerosol optical depth [J]. J Geophys Res Atmos, 120(15): 7726-7736.

Impact of aerosols on the weather, climate and environment of China: an overview

LI Zhanqing

Department of Atmospheric and Oceanic Science, University of Maryland, College Park, MD 20740, USA

Air pollution, weather and climate are closely related to the life of local residents. Global change and sustainable development are common challenges currently faced by all of humankind, yet the issues of air pollution and climate change are especially significant in developing countries. China, as a developing country with the world's largest population and fastest development, is faced with particularly severe challenges in these two regards. Therefore, a thorough understanding of the causes and development mechanisms of air pollution and climate change, as well as a clear understanding of their interrelationship, are of guiding significance to the formulation of sustainable development policies. Along with the development of global change research, aerosols and greenhouse gases, namely the two most important human emissions affecting the Earth's climate, play an important role in climate change science. As a result, aerosol research has become one of the fastest growing branches of geoscience research. The characteristics of China's weather and climate change, such as the increase in high temperature, decrease of cold waves, decrease of wind speed, stabilization of the atmosphere, decrease of light rain, increase of heavy rain, increase of thunderstorms and weakening of monsoons are all related to air pollution by varying degrees. This paper mainly reviews the influence of aerosols on weather and climate in China and the air pollution issues related to meteorological factors, focusing on the complex relationship between aerosols and extreme weather events, including the degree and mechanism of impact. The research method involves an analysis of the comprehensive observation data of satellite, earth and space, along with model simulation. The observation data include long-term historical observation data, short-term enhanced observation experiment data, and global satellite data.

aerosol; air pollution; weather-climate; extreme weather events

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200115005

(责任编辑:袁东敏)