

空气污染对雾影响的研究进展

朱彬^{1,2} 郭婷¹

(1 南京信息工程大学中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 南京 210044;

2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

摘要: 近几十年, 随着城市化的加剧, 空气污染已先后成为一些国家和地区面临的主要环境问题, 空气污染已经对城市及周边雾的物理化学特征产生了显著的影响。雾的发生发展还受到局地和大尺度气象条件变化的影响, 各因子综合作用导致不同国家和地区雾的变化较为复杂。对国内外关于雾和空气污染的关系研究进行了回顾, 包括雾水化学组成及来源、雾水化学组成的形成机制、影响雾形成和变化主要因素分析。结果表明, 能源结构和其使用方式、空气污染治理水平是决定城市及周边雾水化学组成及比例的主要因素; 空气污染、城市化和气候变化是雾形成和长期变化的重要影响因素, 诸因子通过改变宏观或微观的气象和环境条件而影响雾发生发展和长期变化, 影响雾长期变化的物理化学机制值得深入研究。

关键词: 雾水化学, 空气污染, 城市化, 气候变化

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.02.006

Review of the Impact of Air Pollution on Fog

Zhu Bin^{1,2}, Guo Ting¹

(1 Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, NUIST, Nanjing 210044

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing 210044)

Abstract: In recent decades, air pollution has become a major environmental problem following the industrialization and urbanization in many countries and regions. Air pollutants have significant effect on the physical and chemical characteristics of fog in urban and surroundings. This paper reviews the main progresses on the research of relationships between fog and air pollution, including fog-water chemical compositions and their sources, the formation mechanism of chemical composition, the factors influencing fog formation and change. Results show that: the structure and usage ways of energy sources and air pollution control level are the main reasons for chemical composition of fog in the urban and surroundings. The urbanization, climate change and air pollution are the three main factors that affect the formation and the long-term change of fog. Via altering macro and micro meteorological and environmental conditions of fog, the further studies might focus on the physical and chemical mechanism inducing long term variation of fog.

Keywords: fog chemistry, air pollution, urbanization, climate change

0 引言

气象学上, 雾和霾分别对应着不同的天气现象, 在物理化学性质和特征上二者有着显著的区别。而近年来, 无论在报纸、电视等媒体还是学术论文上都能听到或看到雾霾、雾霾天等词, 雾、霾又常常让人联想到空气污染。既然雾和霾有显著的不同, 为什么又经常把它们连在一起呢? 因为它们发生的气象条件很类似; 作为大气中的微粒, 它们又有许多共同点和联系。实际上, 历史上一些著名空气污染事件都与雾、霾以及它们的相互影响有关, 如伦敦烟雾事件^[1]、马

斯河谷烟雾事件^[2]等。

本文拟重点回顾空气污染对雾影响的研究进展, 从雾水化学组成及其来源、雾-气溶胶相互作用、城市化和环境气候变化对雾的影响等方面展开论述, 并指出雾、霾长期变化研究和雾、霾相互作用研究的科学意义。

1 雾水化学组成及其来源

随着全球经济的发展, 工业化和城市化进程的推进, 资源和能源的消耗量日益增加。资源和能源利用率水平较低的地区, 其空气质量管理水平往往亦相对落后, 大量工业废气、汽车尾气和其他人为排放的污染物未经有效处理即排入大气, 导致城市、城市群和区域空气质量严重恶化。

大气中的污染气体和气溶胶可以通过物理和化学

收稿日期: 2015年12月1日; 修回日期: 2016年1月12日
第一作者: 朱彬(1969—), Email: binzhu@nuist.edu.cn
资助信息: 国家自然科学基金(41575148, 41275143)

过程进入雾滴进而影响雾水化学组成,因此雾水化学成分在一定程度上可以反映一个地区的污染状况^[3]。对雾水化学成分的分析也有利于更好地理解大气中污染物的成分。云水化学与雾水化学分析结合,可以解释和证明空气污染物长距离输送^[4]。

1.1 雨/云/雾水化学的早期认识

对大气中水的化学组成的早期认识可以追溯到19世纪中叶Smith对英格兰降雨化学的研究^[5-6],他首次提出“酸雨(acid rain)”这一术语,建立了降水采集和化学组成的分析方法,发现城市、市郊和乡村降水酸度的差异,指出降水化学组成和燃煤、空气团来向等因子的关系。雾的研究也较早受到大气科学界的关注^[7],而对雾水化学成分的研究大约始于20世纪40年代,Cunningham^[8]发现雾水中氯离子可能源于海洋,因为距离海洋越远的观测站氯离子浓度越低甚至检测不出来。Houghton^[9]发现,相比于氯离子,硫酸根在所有站的雾/云水中都能测出,在大气中分布较均匀,并推测硫酸根是由二氧化硫在大气中经历了氧化过程形成的。20世纪50年代末至60年代初,Mrose^[10]收集分析了德国4个山区站和1个海岸站的大量降水(雨和雪)和雾水样品,发现硫酸盐、铵根、氯离子是大气水物质中的主要离子,钾离子、钠离子和钙离子在雾水中也有检出,雾水中的离子浓度和人为核素(当时在大气中的核试验残留物)远比雨水中的高,

酸化一般也更剧烈,并且明确指出雾水化学成分与空气污染的关系。

1.2 雾水的化学组成及其环境意义

20世纪80年代至今,国内外开展了很多有关雾的宏微观结构和物理化学特征的外场试验和数值模拟研究,雾水化学研究已成为云雾物理研究的重要方面^[11-17],例如国际上“雾、雾收集和露”委员会及会议尤其关注雾水化学及其影响因子研究^[18]。对雾水化学成分研究最多的是其中的水溶性无机和有机离子,表1总结了世界部分地区以及不同时期雾中水溶性离子组成。由表可见,雾水中的主要无机离子组成有:SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺、H⁺、Cl⁻等。此外还有甲酸根、乙酸根等有机酸根,它们在植被覆盖率高的地区含量较高。需要指出的是,CO₃²⁻和HCO₃⁻来源于土壤和大气,但由于它们的化学不稳定性(H₂CO₃—HCO₃⁻—CO₃²⁻体系受溶液pH值和气相CO₂浓度影响)以及检测的困难,对其的测量很少,但其含量可能并不低。

雾发生在近地面,雾水中离子成分可以反映地区大气污染特征。海岛或沿海站显示出明显的海洋性特征,Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻离子浓度较高;内陆背景站显示出地壳元素特征,Ca²⁺、Mg²⁺、NH₄⁺离子浓度较高。如舟山、庐山和南岭大瑶山受人为活动直接影响较小,舟山为海洋站点,受海盐气溶胶影响,其雾水离

表1 国内外部分地区和不同时期雾水化学组成
Table 1 Chemical composition of fog water in different periods in domestic and foreign regions

地区	时间	N	pH	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
舟山 ^[19]	1987年4—5月	31	6.01	64.8	185.1	961.7	65.1	291.5		954.4	205.3	166.9
庐山 ^[21]	1987年4月	60	5.36	14.5	106.5	18.9	12.6	323.1	9.1	25.6	219.9	73.5
重庆 ^[27]	1984—1990年	182	4.39	1019.9	3685.4	1486.4	1482.7	3307.5	1063.9	2062.3	6450	991.6
上海 ^[28]	1993—1995年	80	6.02	510.0	6610.0	1760.0	3050.0	1630.0	550.0	480.0	8650	2530
景洪 ^[38]	1988年12月	6		32.5		44.8		577.6	123.2	133.2	298.8	43.2
景洪	1997年11月	4	6.32	773.3	518.8	238.3	134.9	3211.0	2734.0	794.0	1113	115.0
勐养 ^[31]		8	8.34	320.1	784.1	31.9	32.4	28.3	258.2	100.4	330.5	32.5
南岭	1999年	21	6.10	186.8	255.0	65.1	10.7	1299.8	78.6	104.5	662.5	250.0
大瑶山 ^[22]	2001年	36	5.2	102.7	818.3	55.5	26.0	82.1	7.3	9.1	687.9	8.3
南京 ^[30]	2006年12月	13	5.63	375.10	1508.4	2566.3	144.0	9485.5	539.5	993.7	5634	1567.3
美国Whitetop ^[23]	1997年	552	3.63	2.93	10.28	14.2	3.90	210.8		25.8	328.9	155.9
美国加州中部山谷 ^[24]	1982—1983年		2.5~7.5					5370~10520			1125~2500	3140~5140
	2010—2011年		6.3~7.5					1000			150	580
韩国Daekwanreung ^[25]	2002年	216	4.70	11.50	34.5	65.0	9.75	669		54	248.5	481
	1994—1995年		6.0	50	40	40	10	2500		180	410	120
意大利Po Valley ^[11-12,30]	2001—2002年		5.9	20	30	40	10	1800		120	320	110
	2010—2011年		6.9	20	20	40	20	730		70	100	450
日本Hokkaido ^[33]	2006年		4.48	28	28	254	56	410		288	348	178
	2012年		4.66	14.4	19.8	122	26	312		144	146	102

注: N为样本数。

子 Na^+ 和 Cl^- 绝对值和相对量都很高^[19]；雷州半岛的湛江港附近既表现出海雾特征也显示出人为污染的影响^[20]；而两个山区站总离子浓度较低， Ca^{2+} 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 相对较高^[21-22]， Ca^{2+} 来源于土壤， NH_4^+ 源于有机腐殖质分解，山区 SO_4^{2-} 主要源于 SO_2 的氧化。与美国^[23-24]、韩国^[25]和日本偏远或乡村地区^[26]雾水离子比较发现，国外这几个地区 Ca^{2+} 浓度很低，是否说明即使在我国乡村地区，人为活动已经显著改变了自然地表，造成地壳物质排放增高？这有待进一步研究。国内外乡村地区 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 并无显著差别，可能是偏远山区 NH_4^+ 、 NO_3^- 主要源于生化自然活动，而 SO_4^{2-} 主要源于区域 SO_2 输送和氧化。我国乡村地区雾水基本未酸化，而国外几个乡村站雾水已酸化，美国Whitetop山站雾水pH值低值3.63，这与它们雾水中碱性物质低浓度有关，如 Ca^{2+} 低^[23]。

城市人为活动地区与乡村地区相比，雾水离子浓度要高得多。重庆^[27]、上海^[28-29]、南京^[30]总离子和 SO_4^{2-} 浓度较清洁地区可高达1个数量级，西双版纳城、郊^[31]雾水离子浓度差别很大，说明人类生产生活对大气环境影响巨大，当今城市雾已远非自然状态的雾了^[32]。这一方面是由于城市污染源强，另一方面是城市雾水含量较低，气体和气溶胶在城市雾水中浓缩。值得一提的是，有大量观测表明，雾水较之云水和降水，化学成分浓度高得多，但雾水并不一定更酸，云水和降水酸化有时更明显^[33-34]。雾发生在近地层，较之云水和降水更易受到地表污染源排放的较高浓度气体和气溶胶物理化学特征的影响。在德国厄尔士山脉多年的观测发现，雾水中 Cl^- 、 Na^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 等离子含量与雨水中离子含量的比值比1992年以来有所降低，说明欧洲地区空气污染明显好转^[35-37]。而雾/云/降水是否酸化主要取决于液水中酸碱离子的相对浓度。前已述及，由于人为和自然源的排放， SO_2 氧化为硫酸的过程在很多地区普遍存在，如果云降水中缺乏碱性离子（ Ca^{2+} 、 NH_4^+ 等），则云降水的 H^+ 浓度高、pH值低，形成酸雨。如我国南方地区土壤酸性强，即使云降水中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等致酸离子含量并不比北方高，其雨水也较易酸化。反之，雾水中即使 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 离子浓度很高，但 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 等离子浓度也高，雾水就不一定酸化。

雾水化学组成的长期变化可以反映局地 and 区域环境变化。在我国云南景洪，1988和1997年开展过两次雾的观测试验（表1）^[31, 38]，结果表明，由于城市的发展、人为活动的增加，10a间景洪雾水总离子浓度增加6.9倍；而1997年的西双版纳热带雨林勐养还保持着背景雾水化学的特征。国际上，雾的观测资料积累时

间最长的当属意大利北部波河谷地区^[36]和美国加利福尼亚州中部山谷地区^[24]，近20~30a在这两个地区开展过很多雾的外场综合观测，两地30a来雾水含量都下降较多，雾、浓雾（能见度小于200m）发生频次减少明显，这可能是由于气温升高和空气质量改善引起的凝结核减少所致。波河谷地区^[36]雾水电导率、总离子及三种主要离子（ SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ ）都呈现显著下降趋势。2010/2011年与1993/1994年观测资料对比，电导率、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 分别下降了75%、76%、43%和55%，这与该地区20世纪90年代以后空气质量改善有直接关系，其中 SO_2 大幅减排（减排90%）是 SO_4^{2-} 的急剧下降的主要原因，而 NO_x 只减排了44%，相应地 NO_3^- 降低较少（43%）。

SO_2 和 NO_x 不同程度的减排实际上反映了产业和能源结构的变化，工业排放（以 SO_2 、 NO_x 为主）得到有效控制，而汽车保有量和汽车总排放量增加（以 NO_x 为主），从而使 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 比值下降。欧洲、美国、日本等发达地区雾和雨水中 NO_3^- 一般已超过 SO_4^{2-} 浓度水平。加州中部山谷地区雾和雨水中 NO_3^- 也大大超过 SO_4^{2-} 浓度水平，这也是该地区 SO_2 排放大幅减少的结果。近30a，加州中部山谷雾水平均pH值升高了1个多单位，特别是20世纪80年代初可观测到酸化严重的雾水（ $\text{pH}<4$ ），但在近年已经绝迹^[24]。发展中国家城市有较高的 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 和相对较低比例的 NO_3^- （绝对值仍很高），而发达国家表现出较高的 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值和低总离子浓度和电导率，这是由于发展中国家能源结构多以煤为主，而汽车保有量较低， NO_x 排放相对 SO_2 低导致的。由多年历史数据变化也可以看出，发达国家在20~30年前 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值较低，由于硫的排放得到有效控制，而汽车保有量增加， $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值持续增高；我国部分大城市的数据显示，由于同样原因，近20多年表现出 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值增高的现象^[28]。可见，能源使用方式和能源结构是决定城市及周边雾水化学组成比例的主要原因。日本北海道受人为活动影响较小，其2006—2012年的观测除了 NO_3^- 略有下降（认为与人为 NO_x 排放减少有关）外， SO_4^{2-} 可能主要来自火山 SO_2 排放等自然源，未发现 SO_4^{2-} 等其他离子浓度有显著变化^[29]。

在对比分析各地或某地雾水化学组分浓度长期变化时，还应注意考虑雾的液水含量（LWC），污染物不变而LWC较低或下降会导致化学组分浓度增加。不同的LWC下，雾水组分浓度并不一定能反映空气质量的变化。此外，在研究雾水组分的生态环境效应时，更关注的是与LWC关系更大的雾水组分的沉降通量^[39]。

雾水中的主要化学成分除水溶性无机离子外，还

有水溶性有机物 (WSOC), 如有机酸和醛类物质, 以及难溶性悬浮物质, 它们主要包括地壳物质 (低溶解度的碳酸盐、硅酸盐、铝/钙/镁等金属氧化物)、非碳酸盐含碳物质 (黑碳和有机碳)、生物有机物等。波河谷地观测发现的可溶性有机物主要有甲酸、乙酸、草酸、多元酸、醛类等, 这些可溶性有机物占了雾水中可溶物质的25%左右。不溶性物质可以通过滤膜过滤雾水收集分析, 波河谷地研究关注了雾水中悬浮的元素碳 (EC) 和不溶性颗粒有机碳 (POC), 发现EC和POC占了雾水中不溶物质的46%~56%, 其他不溶物质由各类难溶性矿物质组成; EC又占了不溶性碳物质的19% (中值浓度1.2mgC/L), 而POC占了不溶性有机物的大部分 (中值浓度5.8mgC/L), EC和POC主要来自各类人为燃烧活动。如果把总有机碳 (TOC) 定义为WSOC与POC之和, 则WSOC占了TOC的52%~95%, 平均86%^[36]。樊曙先等^[40]还研究了雾的不同阶段气溶胶上多环芳烃的变化特征。

Li等^[15]、Niu等^[16]、牛生杰^[41]从雾水采样、离子分析方法等方面进行系统总结, 并揭示了不同地区、不同类型 (主要为内陆辐射雾和海岸平流雾) 雾和雾中气溶胶的微物理特征、与边界层特征结合的宏观结构特征、雾水化学特征, 以及雾的形成、发展、消散过程的物理机制。这里不再赘述。

1.3 雾水化学组成的形成机制

通过分析雾水化学成分, 不仅可以推测这些成分的来源, 还可以了解其形成过程, 如气溶胶作为雾滴的凝结核触发雾的形成, 之后再通过布朗扩散、直接拦截、惯性碰并、热致电泳、扩散电泳和静电作用使气溶胶粒子进入雾滴^[42]; 而易溶和可溶性气体可以通过气液界面的交换过程 (吸收) 进入雾滴, 从而形成雾的基本化学组成。雾滴中还可以发生液相化学反应, 形成新的化学物质, 如SO₂的液相氧化速率至少高于气相中的1~2个数量级, 这可能是我国雾—霾天SO₃特别高的原因之一^[43-44]。SO₂、NO_x等的液相氧化与反应环境的pH、金属催化剂等关系很大, 如高pH环境以O₃氧化为主、低pH以H₂O₂氧化为主, 这些物理和化学机制已有很多经典研究^[45-46]。

雾滴的微观尺度大小不同 (3~100μm)、比表面积差异大 (小雾滴具有更大的比表面积), 以及对气溶胶和气体碰并、吸收、吸附的物理化学特征也不同, 这都会导致雾滴谱化学组成的差别; 在不同的化学成分、浓度和环境下, 发生的化学反应程度、产物都可能不同; 此外, 不同尺度雾滴沉降速率差异大, 最终导致雾滴谱化学组成的较大差别。由于比表面积

和沉降速率的差异, 表现出雾滴化学和其尺度的依存关系, 如观测发现的平均尺度小的雾滴比大雾滴一般含有较高的总离子浓度^[47-48]。技术上得益于多级雾水采样器的研发^[48-49], 雾滴化学和其尺度的依存关系研究得以有效开展, 进一步揭示雾中发生的物理和化学过程及其相互作用。Hoag等^[50]、孙玉等^[51]发现小雾滴含有较高的总离子浓度、主要离子有SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、Fe²⁺/Fe³⁺、Mn²⁺, 雾水pH值也较低; 大雾滴一般含不溶性矿物质较多, 雾水pH值较高; 而H₂O₂在大小雾滴中的浓度差别不大。由于大雾滴的沉降速率较大, 在大雾滴中富集的成分会较快清除, 而在小雾滴中富集的成分在大气中的寿命更长, 表现出化学成分的沉降分馏机制^[52-53], 类似于雨滴谱清除气溶胶谱的机制^[45]。沉降是雾中气体和气溶胶重要的清除机制, 观测发现的气溶胶尺度谱的变化是由雾对气溶胶清除以及随后雾的沉降导致的^[42,53]。

雾水化学数值模式可以考虑到气溶胶凝结活化形成雾滴、气溶胶—气体通过前述物理过程进入雾滴、气相—液相相互作用的化学反应, 以及气溶胶和雾滴的微物理过程及其雾滴的沉降过程。雾滴分档的雾水化学模式基本可以重现雾滴化学的尺度变化, 并且能更好地模拟雾中硫酸盐浓度^[54-55], 而总体雾水化学模式往往低估SO₂的液相氧化率和硫酸盐浓度, 模式模拟进一步确认了分档的雾滴沉降和雾滴化学反应是雾水化学尺度依存关系的主要原因^[56-57]。Schell等^[58]在分析两个不同尺度的云滴化学成分观测资料时发现, 少部分个例表现出大滴浓度高的特征, 数值模式的敏感性试验表明, 新形成的云在一定的气溶胶条件下可以出现此特征。

2 影响雾形成和变化的因素

研究雾的宏观特征时, 一般认为近地层从来都不缺乏气溶胶等凝结核, 雾的形成主要由降温 (如夜间辐射冷却)、增湿 (如暖湿气流输送) 以及两个过程的结合而决定^[59]。但雾的微观研究必须考虑到气溶胶尺度以及由其化学组成决定的吸湿活化能力的不同, 可能在大气未饱和时, 有的气溶胶就开始活化形成雾滴; 或者过量的气溶胶在有限的水汽含量下, 可能处于霾粒子的阶段, 即气溶胶反而抑制了雾的形成。因此, 雾的形成条件至少包含降温、增湿和气溶胶条件及其组合等。

近半个世纪以来, 全球变暖加剧, 全球大部分地区对流层特别是近地层气温显著升高; 城市化带来的土地利用变化、城市热源增加以及由它们所致的地表—大气能量平衡的变化、风速降低, 可形成城市及

其临近地区显著的热岛效应和干岛（部分城市增湿）效应，这些变化和效应均改变雾的形成和维持条件。此外，人类活动和空气污染还显著增加了一次、二次气溶胶在大气中的浓度，如前所述，可能会抑制或促进雾的形成，从而改变大雾、雾、轻雾和霾发生的频率。雾通常在低风速和稳定近地层条件下发生，因此大气环流调整、季风强度的年际变化会引起近地层风速、风向的变化，还会引起温度和水汽的变化，对雾发生频率的年际变化也会产生重要影响。因此，雾的宏微观特征、长期变化趋势、雾—霾相互关系的研究已经不能局限于云物理和气候领域，只有从气候变化、云物理和大气化学等多角度开展综合研究，才能揭示上述这些人为和自然变化因子对雾形成、特征和变化的作用机制。

2.1 城市化和气候变化对雾形成及其长期变化的影响

进入20世纪80年代以后，中国中东部地区快速的城市化、工业化和人口迁入，对该地区的能源、资源和土地使用类型已产生巨大影响。研究发现，由于城市化导致的地表能量平衡变化、人为污染导致的气溶胶增加，以及雾的发生频率、强度皆可能发生变化^[60]。国内外大部分研究发现，城市化导致热岛、干岛^[61-62]，但一些特殊地形，如重庆则呈现热岛伴随湿岛。Li等^[63]认为重庆地形复杂、处于两江交汇处，城市热岛环流可以增强市区与长江之间的水汽辐合上升，形成特殊的“热岛+湿岛”现象，这有利于雾的垂直发展；但城市高温又不利于雾的形成。随着人类活动增加，世界上一些地区植被覆盖率下降，下垫面性质的改变、植物蒸腾作用的减少都不利于雾的形成^[64]。

在雾的长期变化上，Sachweh等^[64]发现，德国慕尼黑及周边地区自1949—1990年雾频减少约50%，主要原因是城市化加剧、植被减少、下垫面改变而使热储存率下降、人为热增加、湿度源减少，导致城市热岛和干岛：温度增加、比湿下降效应。他们的研究还指出，在发达国家城市，风速降低和空气污染带来的吸湿性凝结核是有利于雾的形成的，但发达国家空气污染轻，风速降低和凝结核增加效应不足以抵消升温、减湿效应。而发展中国家空气污染严重得多，城市导致的热岛、干岛、污染岛都会使雾频下降。Vautard等^[65]采用更新更广泛的数据进行研究并发现，整个欧洲雾、轻雾、霾发生频次自20世纪80年代以后均在下降，能见度增加，认为欧洲空气质量的改善在其中起到较大的作用。Dai^[66]利用大量站点气候资料和再分析资料，研究了全球地表湿度的变化特征及其影响因素。

在我国，孙丹等^[67]分析了1956—2001年雾频的变化，发现除华北平原雾整体增加外，其他地区基本呈减少趋势或者变化不大，雾频明显减少的时间在1994年前后；陈潇潇等^[68]得到类似结果。吴兑等^[69]分析了1951—2005年中国大陆雾、轻雾的长期变化趋势并发现，长江以南各省的轻雾日数明显多于长江以北地区，而且20世纪80年代以后轻雾日有明显增加。在研究华北平原雾长期变化趋势时，Fu等^[70]发现，1995年以前华北雾频是增加的，1995—2003年相对平缓，2003年之后雾频急剧下降。而Niu等^[71]针对我国中东部研究指出，近30a中国中东部雾日数翻倍，并认为这是由于东亚冬季风减弱，即冷空气不活跃、地面风速减小造成的。Shi等^[72]研究安徽雾的长期变化时发现，安徽大部分城市20世纪60—80年代中期雾频增加，之后则减少；老城市和新城市雾的变化又有不同，新城市雾频基本是持续增加的，即城市发展不同阶段或者空气污染条件的不同可导致雾的不同变化特征；其还发现，最近30a城市雾的消散时间明显推后，平均持续时间增加。史军等^[73]发现在1961—1980年和1981—2007年期间，华东多数地区的雾日数分别呈现出增多和减少的变化趋势，而霾日数则在两个时期都表现为增多的趋势。田心如等^[74]研究发现，江苏省年雾日数在20世纪80年代前中期为鼎盛期，之后呈较快的下降趋势；大雾持续时间呈显著增长趋势，主要表现为雾消时间的推迟。伍红雨等^[75]发现，1961—2008年华南雾日数下降而霾日数增加明显；云南的雾和霾日数呈一致减少趋势。而同期我国绝大多数地区霾的长期变化则是显著增加的，特别是1980年以后^[76-77]。

研究雾、霾长期变化特征时，要用到气象测站相对湿度、能见度、温度、风和天气现象记录等气象要素的长期资料，要求测站周边观测环境最好长期维持相对不变。但我国大部分测站不仅观测环境变化很大，测站本身位置也多次迁移。因此在利用长期数据进行气候统计分析时，往往要考虑观测点代表性、观测环境变化等因素的影响^[78]。孙丹等^[67]、Fu等^[70]和Niu等^[71]对华北和中国中东部地区雾长期趋势研究得出的不同结论可能就与站点的选择不同有关。在采用气象站长期数据进行气候统计分析时，往往要考虑观测点代表性、观测环境变化等因素的影响^[79]。

2.2 空气污染、气溶胶与雾的关系

霾和雾既可单独存在，也可以共存。近年来我国很多城市霾往往持续数日，在此期间，当空气湿度达到或接近饱和时，雾就可能出现。当空气湿度降低

时,雾会蒸发消散,霾粒子又会再次大量出现,即存在雾—霾转化现象^[80-81]。雾过程中那些未活化的粒子常被称为间隙气溶胶粒子。成雾之后,通过一系列后续过程(包括液相化学反应、气溶胶粒子与雾滴的碰并以及雾滴之间的碰并),还将继续改变雾滴和气溶胶的化学和物理性质。由此,当相对湿度下降,雾蒸发后的气溶胶粒子的化学成分和尺度谱分布将与之前的状态有很大不同^[53,82]。

在发展中国家,伴随城市化和工业化而来的就是空气污染。机动车尾气、工业废气等空气污染物排放量都在不断增加,不仅使城市空气质量恶化,而且使形成雾的凝结核产生微物理和化学成分的改变。气溶胶浓度较低时,随着凝结核的增加,雾滴数浓度增加,人为气溶胶的吸湿性有利于雾的形成;但在高气溶胶浓度时,随着气溶胶增加,过多的凝结核争食水汽,反而不利于雾的形成^[16,54]。目前我国的气溶胶水平常发达国家的10倍左右,这么高的气溶胶水平所导致的雾的变化与发达国家的清洁地区应有很大不同之处^[71]。Quan等^[83]研究了华北1954—2009年雾、霾长期变化的关系,发现霾频次在40d/a以下时,雾、霾发生频次有强的正相关;而当霾的发生频次超过75d/a时,雾、霾的关系不明显。至于促进或抑制气溶胶浓度的临界值是多少,尚需大量观测和数值模拟研究确认。这个问题实质上等同于在气溶胶—云相互作用研究中,气溶胶是促进还是抑制云降水的发展以及气溶胶正负效应的临界值是多少的问题^[84]。气溶胶的辐射效应还可以改变环境温度,在夜间吸收地表红外辐射,温度升高,不利于夜间成雾^[85]。

目前的气象和大气化学双向耦合模式已可以考虑宏观云雾物理和云雾/气溶胶微物理化学过程以及各过程之间的反馈。WRF-Chem是中尺度气象和大气化学双向耦合模式的代表,充分考虑了地表与边界层物质能量交换、气溶胶直接辐射效应以及气溶胶凝结核成云成雾过程,可用于研究城市化和气溶胶直接和间接效应对雾发生发展的影响以及气象要素之间的反馈关系。贾星灿等^[86]应用该模式研究了我国华北和华东地区冬季的一次严重雾—霾过程,认为通过微物理、热力和动力作用,人为污染条件下的边界层结构更有利于雾的形成,人为大气污染物使雾的范围最大增加50%,强度加大、持续时间延长。Gao等^[87]应用该模式研究了2013年1月华北平原气溶胶与边界层温湿风结构的反馈过程,表明在严重霾污染下,地表短波辐射明显下降,边界层上部则增温,由此导致大气稳定度加强、边界层下降,抑制对流和扩散,从而使得污染加剧。王自发等^[88]应用WRF-NAQPMS双向耦合模

式,研究了同期我国中东部的持续强霾过程,发现静稳天气仍旧存在显著的区域污染输送,指出气象—大气污染双向反馈机制对强霾的形成非常重要,忽视之会导致模式对污染物浓度的较大低估。

3 空气污染对雾影响研究的展望

IPCC历次报告越来越确认,全球大部分地区对流层特别是近地层气温显著升高;同时城市化可形成城市及其邻近地区显著的热岛、干岛和空气污染;大气环流的调整也会引起近地面风、温、湿等要素的变化,这些变化和效应均会改变雾的形成和其维持条件。气候变暖、城市化和空气污染都与人为活动增加有关,要区分它们各自的作用并不容易。因此,研究空气污染对雾的影响要从云雾物理、大气化学和气候变化多角度开展综合研究,才能揭示这些人为和自然变化因子对雾形成、特征和变化的作用机制。IPCC第四次评估报告^[89]和第五次评估报告^[90]都有专门的章节,对气溶胶—云和气溶胶—气候相互作用的研究进展进行评述和展望,而对气溶胶—雾的关系则几乎没有涉及。尽管雾可看作是接地的云,但其受区域气候、地表类型改变和人为污染影响更大、响应信号更强,因而值得深入研究。

雾化学组成研究要与雾的物理化学过程和机制研究、微观过程与宏观变化相结合^[54-55, 91]。只有把雾中的液相化学和非均相化学过程和物理过程相结合,才能解释观测到的复杂多变的雾水化学组成特征,发现新的观测事实并提出新的科学假设。雾的物理化学模式模拟可以进一步揭示雾水化学组成形成的机制,深入认识空气污染对雾的影响。观测资料还可以验证模式,新的机制可以改进模式。因此,一方面要继续开展雾水化学长期观测、积累各地各时期复杂多变的组成特征,分析其隐含的环境气候变化意义;另一方面要发展三维分档云雾化学模式,在模式不同尺度过程结合、机制不确定性和计算效率上都存在很大挑战^[92]。

气溶胶中有机成分的确认是气溶胶化学组成研究的最不确定之处,也是大气环境研究的重点和热点之一。同样,雾中有机化合物的组成和化学特征值得关注,液相的有机物和有机化学反应也是气相有机物的源或汇^[93]。在云凝结核的核化能力的研究上,有学者认为其尺度效应比其化学效应更重要^[94]。但对于雾水,其化学成分浓度更高、组成更复杂,除了含有吸湿性的盐核,也有具有表面活性的有机物^[95-97],高浓度盐核和表面活性有机物都会改变雾凝结核的活化能力、影响雾的形成和维持。因此,雾凝结核的尺度和

其化学组成何者决定其活化能力还未有定论, 需要进一步的观测和理论模拟研究。对雾凝结核的物理化学性质的认识也是对云雾物理机制认识的深化和推进。

由于各地的气候条件、城市化水平和空气污染条件不同, 甚至对全球变暖的响应也不同, 所以不同地区雾的气候特征并不一致, 甚至存在较大差异。有必要利用各代表性站点^[80]的长期气象与环境资料, 揭示各地区雾频次与区域气候变化、城市化和空气污染的关系。利用天气—大气化学耦合模式, 模拟分析典型雾和霾个例, 探讨城市化和空气污染对雾和霾演化的影响, 揭示诸因子相互作用影响雾发生的机制。研究结果不仅对认识雾与气候环境变化的关系具有科学意义, 也可为气溶胶—云相互作用的理论研究提供直接证据。

参考文献

- [1] Wilkins E T. Air pollution aspects of the London fog of December 1952. *Journal of Royal Meteorological Society*, 1954, 80(344): 267-271.
- [2] Nemery B, Hoet P H M, Nemmar A. The Meuse Valley fog of 1930: an air pollution disaster. *The Lancet*, 2001, 357(9257): 704-708.
- [3] Sasakawa M, Uematsu M. Chemical composition of aerosol, sea fog, and rainwater in the marine boundary layer of the northwestern North Pacific and its marginal seas. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, doi: 10. 1029/2001JD001004.
- [4] Błaś M, Polkowska Z, Sobik M, et al. Fog water chemical composition in different geographic regions of Poland. *Atmospheric Research*, 2010, 95(4): 455-469.
- [5] Smith R A. On the air and rain of Manchester. *Memoirs of the Manchester Literary and Philosophical Society*, 1852, 10(Series 2): 207-217.
- [6] Smith R A. Air and rain: the beginnings of a chemical climatology. Longmans, Green, and Company, 1872.
- [7] Taylor G I. The formation of fog and mist. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1917, 43(183): 241-268.
- [8] Cunningham R H. Chloride content of fog water in relation to air trajectory. *Bull Amer Meteor Soc*, 1941, 22: 17-22.
- [9] Houghton H G. On the chemical composition of fog and cloud water. *Journal of Meteorology*, 1955, 12(4): 355-357.
- [10] Mrose H. Measurements of pH, and chemical analyses of rain-, snow-, and fog-water. *Tellus*, 1966, 18(2/3): 266-270.
- [11] Fuzzi S, Facchini M C, Orsi G, et al. Seasonal trend of fog water chemical composition in the Po Valley. *Environmental Pollution*, 1992, 75(1): 75-80.
- [12] Fuzzi S, Castillo R A, Justo J E, et al. Chemical composition of radiation fog water at Albany, New York, and its relationship to fog microphysics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1984, 89(D5): 7159-7164.
- [13] Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. Fog research: A review of past achievements and future perspectives. *Pure and Applied Geophysics*, 2007, 164(6/7): 1121-1159.
- [14] 李子华, 刘端阳, 杨军, 等. 南京市冬季雾的物理化学特征. *气象学报*, 2011, 69(4): 706-718.
- [15] Li Z, Yang J, Shi C, et al. Urbanization effects on fog in China: Field research and modeling. *Pure and Applied Geophysics*, 2012, 169(5/6): 927-939.
- [16] Niu S, Lu C, Yu H, et al. Fog research in China: An overview. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, 27: 639-662.
- [17] Wang X, Chen J, Sun J, et al. Severe haze episodes and seriously polluted fog water in Ji' nan, China. *Science of the Total Environment*, 2014, 493: 133-137.
- [18] Herckes P, Eugster W, Gultepe I, et al. Special Issue: Sixth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew Preface. *Atmospheric Research*, 2015, 151: 1-1.
- [19] 莫天麟, 许绍祖, 陈帆. 舟山地区雾水酸度及其化学组成. *上海环境科学*, 1989, 8(8): 22-26.
- [20] 徐峰, 牛生杰, 张羽, 等. 湛江东海岛春季海雾雾水化学特性分析. *中国环境科学*, 2011, 31(3): 353-360.
- [21] 丁国安, 纪湘明, 房秀梅, 等. 庐山云雾水化学组分的某些特征. *气象学报*, 1991, 49(2): 190-197.
- [22] 吴兑, 邓雪娇, 叶燕翔, 等. 南岭大瑶山浓雾雾水的化学成分研究. *气象学报*, 2004, 62(4): 476-485.
- [23] Anderson J B, Baumgardner R E, Mohnen V A, et al. Cloud chemistry in the eastern United States, as sampled from three high-elevation sites along the Appalachian Mountains. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(30): 5105-5114.
- [24] Herckes P, Marcotte A R, Wang Y, et al. Fog composition in the Central Valley of California over three decades. *Atmospheric Research*, 2015, 151: 20-30.
- [25] Kim M G, Lee B K, Kim H J. Cloud/fog water chemistry at a high elevation site in South Korea. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2006, 55(1): 13-29.
- [26] Yamaguchi T, Katata G, Noguchi I, et al. Long-term observation of fog chemistry and estimation of fog water and nitrogen input via fog water deposition at a mountainous site in Hokkaido, Japan. *Atmospheric Research*, 2015, 151: 82-92.
- [27] 李子华, 董韶宁, 彭中贵. 重庆雾水化学组分的时空变化特征. *南京气象学院学报*, 1996, 19(1): 63-68.
- [28] 李德, 陈明华, 邵德民. 上海雾天大气污染及雾水组分研究. *上海环境科学*, 1999, 18(3): 117-120.
- [29] Li P, Li X, Yang C, et al. Fog water chemistry in Shanghai. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(24): 4034-4041.
- [30] 李一, 张国正, 濮梅娟, 等. 2006年南京冬季浓雾雾水的化学组分. *中国环境科学*, 2008, 28(5): 395-400.
- [31] 朱彬, 李子华, 黄建平, 等. 西双版纳城, 郊雾水化学组成分析. *环境科学学报*, 2000, 20(3): 316-321.
- [32] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾—霾成因及其治理的思考. *科学通报*, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [33] 秦瑜, 赵春生. *大气化学基础*. 北京: 气象出版社, 2003.
- [34] Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. New York: Wiley-InterScience, 2006.
- [35] Lange C A, Matschullat J, Zimmermann F, et al. Fog frequency and chemical composition of fog water—a relevant contribution to atmospheric deposition in the eastern Erzgebirge, Germany. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(26): 3731-3739.
- [36] Zimmermann L, Zimmermann F. Fog deposition to Norway Spruce stands at high-elevation sites in the Eastern Erzgebirge(Germany). *Journal of Hydrology*, 2002, 256(3): 166-175.
- [37] Giulianielli L, Gilardoni S, Tarozzi L, et al. Fog occurrence and chemical composition in the Po valley over the last twenty years. *Atmospheric Environment*, 2014, 98: 394-401.
- [38] 黄玉生, 郭慧光, 刘富兴. 工业区与非工业区辐射雾水的化学组成. *地理学报*, 1992, 47(1): 66-73.
- [39] Thalmann E, Burkard R, Wrzesinsky T, et al. Ion fluxes from fog and rain to an agricultural and a forest ecosystem in Europe. *Atmospheric Research*, 2002, 64(2): 147-158.
- [40] 樊曙先, 黄红丽, 顾凯华, 等. 雾过程对大气气溶胶PM10中多环芳烃粒径分布的影响. *高等学校化学学报*, 2010, 31(12): 2375-2382.
- [41] 牛生杰. *雾物理化学研究*. 北京: 气象出版社, 2014.
- [42] 王瑛, 朱彬, 康汉青, 等. 气溶胶云下清除理论及观测研究. *中国科学院研究生院学报*, 2014, 31(3): 306-313, 321.
- [43] He H, Wang Y S, Ma Q X, et al. Mineral dust and NO_x promote the conversion of SO₂ to sulfate in heavy pollution days. *Scientific Reports*, 2014, 4(8): 4172.
- [44] 王跃思, 姚利, 王莉莉, 等. 2013年元月我国中东部地区强霾污染成因分析. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(1): 15-26.
- [45] Rattigan O V, Jill R, Judd C D, et al. Sulfur dioxide oxidation in clouds at Whiteface Mountain as a function of drop size. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D15): 17347-17358.
- [46] Seinfeld J I. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. *Environment Science & Policy for Sustainable Development*, 2006, 51(2): 212-214.
- [47] Lu C, Niu S, Tang L, et al. Chemical composition of fog water in Nanjing area of China and its related fog microphysics.

- Atmospheric Research, 2010, 97(1): 47-69.
- [48] Collett J, Iovinnelli R, Demoz B. A three-stage cloud impactor for size-resolved measurement of cloud drop chemistry. *Atmospheric Environment*, 1995, 29(10): 1145-1154.
- [49] Moore K F, Sherman D E, Reilly J E, et al. Development of a multi-stage cloud water collector Part 1: Design and field performance evaluation. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(1): 31-44.
- [50] Hoag K J, Collett Jr J L, Pandis S N. The influence of drop size-dependent fog chemistry on aerosol processing by San Joaquin Valley fogs. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(29): 4817-4832.
- [51] 孙玉, 樊曙光, 张健, 等. 南京2013年冬季三级分粒径雾水化学特征. *中国环境科学*, 2015, 35(4): 1019-1031.
- [52] Moore K F, Sherman D E, Reilly J E, et al. Drop size-dependent chemical composition in clouds and fogs. Part I. Observations. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(10): 1389-1402.
- [53] Moore K F, Sherman D E, Reilly J E, et al. Drop size-dependent chemical composition of clouds and fogs. Part II: Relevance to interpreting the aerosol/trace gas/fog system. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(10): 1403-1415.
- [54] Fahey K M, Pandis S N. Size-resolved aqueous-phase atmospheric chemistry in a three-dimensional chemical transport model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D22): 2015-2023.
- [55] Fahey K M, Pandis S N, Collett J L, et al. The influence of size-dependent droplet composition on pollutant processing by fogs. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(25): 4561-4574.
- [56] Pandis S N, Seinfeld J H, Pilinis C. The smog-fog-smog cycle and acid deposition. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1990, 95(D11): 18489-18500.
- [57] Pandis S N, Seinfeld J H, Pilinis C. Chemical composition differences in fog and cloud droplets of different sizes. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1990, 24(7): 1957-1969.
- [58] Schell D, Wobrock W, Maser R, et al. The size-dependent chemical composition of cloud droplets. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(16): 2561-2576.
- [59] 盛裴宣, 毛节泰, 李建国, 等. 2003. 大气物理学. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [60] 徐祥德, 施晓晖, 张胜军, 等. 2005. 北京及周边城市群落气溶胶影响域及其相关气候效应. *科学通报*, 50(22): 2522-2530.
- [61] Sachweh M, Koepke P. Radiation fog and urban climate. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(9): 1073-1076.
- [62] 寿亦萱, 张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望. *气象学报*, 2012, 70(3): 338-353.
- [63] 李子华. 中国近40年来雾的研究. *气象学报*, 2001, 59(5): 616-624.
- [64] Sachweh M, Koepke P. Radiation fog and urban climate. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(9): 1073-1076.
- [65] Vautard R, Yiou P, van Oldenborgh G J. Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years. *Nature Geoscience*, 2009, 2(2): 115-119.
- [66] Dai A. Recent climatology, variability, and trends in global surface humidity. *J Climate*, 2006, 19(15): 3589-3606.
- [67] 孙丹, 朱彬, 杜吴鹏. 我国大陆地区浓雾发生频数的时空分布研究. *热带气象学报*, 2008, 24(5): 497-501.
- [68] 陈潇潇, 郭品文, 罗勇. 中国不同等级雾日的气候特征. *气候变化研究进展*, 2008, 4(2): 106-110.
- [69] 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 中国大陆1951—2005年雾与轻雾的长期变化. *热带气象学报*, 2011, 27(2): 145-151.
- [70] Fu G Q, Xu W Y, Yang R F, et al. The distribution and trends of fog and haze in the North China Plain over the past 30 years. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(21): 11949-11958.
- [71] Niu F, Li Z, Li C, et al. Increase of wintertime fog in China: Potential impacts of weakening of the Eastern Asian monsoon circulation and increasing aerosol loading. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D7): 1485-1490.
- [72] Shi C, Roth M, Zhang H, et al. Impacts of urbanization on long-term fog variation in Anhui Province, China. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(36): 8484-8492.
- [73] 史军, 崔林丽, 贺千山, 等. 华东雾和霾日数的变化特征及成因分析. *地理学报*, 2010, 65(5): 533-542.
- [74] 田心如, 白莉娜, 唐红昇, 等. 江苏省大雾持续时间及相关要素的周末效应. *环境科学与技术*, 2012, 35(12J): 117-122.
- [75] 伍红雨, 杜尧东, 何健, 等. 华南霾日和雾日的气候特征及变化. *气象*, 2011, 37(5): 607-614.
- [76] 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 1951—2005年中国大陆霾的时空变化. *气象学报*, 2010, 68(5): 680-688.
- [77] Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. Atmospheric aerosol compositions in China: Spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols. *Atmos Chem Phys*, 2012, 12: 779-799. doi: 10.5194/acp-12-779-2012.
- [78] 刘勇, 王东勇, 田红, 等. 气象观测环境的变化对气温序列的影响分析. *气象科学*, 2006, 26(4): 436-441.
- [79] 郭建侠. 地面气象要素观测环境标准研究. *中国科技成果*, 2014(15): 30-32.
- [80] William M J, Jacob D J, Waldman J M, et al. Fogwater chemistry in an urban atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1983, 88(C9): 5109-5121.
- [81] 杨军, 牛忠清, 石春娥, 等. 南京冬季雾霾过程中气溶胶粒子的微物理特征. *环境科学*, 2010, 31(7): 1425-1431.
- [82] Eck T F, Holben B N, Reid J S, et al. Fog and cloud induced aerosol modification observed by the Aerosol Robotic Network(AERONET). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D7): 107-116.
- [83] Quan J, Zhang Q, He H, et al. Analysis of the formation of fog and haze in North China Plain (NCP). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(15): 8205-8214.
- [84] Rosenfeld D, Lohmann U, Raga G B, et al. Flood or drought: How do aerosols affect precipitation? *Science*, 2008, 321(5894): 1309-1313.
- [85] Bott A. On the influence of the physico-chemical properties of aerosols on the life cycle of radiation fogs. *Boundary-Layer Meteorology*, 1991, 21(1/2): 1-31.
- [86] 贾星灿, 郭学良. 人为大气污染物对一次冬季浓雾形成发展的影响研究. *大气科学*, 2012, 36(5): 995-1008.
- [87] Gao Y, Zhang M, Liu Z, et al. Modeling the feedback between aerosol and meteorological variables in the atmospheric boundary layer during a severe fog-haze event over the North China Plain. *Atmos Chem Phys*, 2015, 15(11): 1093-1130.
- [88] 王自发, 李杰, 王哲, 等. 2013年1月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(1): 3-14.
- [89] Solomon S. *Climate change 2007: The physical science basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change viii*, 996. Cambridge, UK, and New York: Cambridge Univ Press, 2007.
- [90] Qin D, Plattner G K, Tignor M, et al. *Climate change 2013: the physical science basis*. Cambridge, UK, and New York: Cambridge University Press, 2014.
- [91] Yue Y, Niu S, Zhao L, et al. The influences of macro- and microphysical characteristics of sea-fog on fog-water chemical composition. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(3): 624-636.
- [92] Tost H, Jockel P, Kerkweg A, et al. Global cloud and precipitation chemistry and wet deposition: tropospheric model simulations with ECHAM5/MESy1. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 2007, 7(10): 2733-2757.
- [93] Herckes P, Valsaraj K T, Collett J L. A review of observations of organic matter in fogs and clouds: Origin, processing and fate. *Atmospheric Research*, 2013, 132(10): 434-449.
- [94] Dusek U, Frank G P, Hildebrandt L, et al. Size matters more than chemistry for cloud-nucleating ability of aerosol particles. *Science*, 2006, 312: 1375-1378.
- [95] Facchini M C, Decesari S, Mircea M, et al. Surface tension of atmospheric wet aerosol and cloud/fog droplets in relation to their organic carbon content and chemical composition. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(28): 4853-4857.
- [96] Collett J L, Herckes P, Youngster S, et al. Processing of atmospheric organic matter by California radiation fogs. *Atmospheric Research*, 2008, 87(3): 232-241.
- [97] Reyes-Rodriguez G J, Gioda A, Mayol-Bracero O L, et al. Organic carbon, total nitrogen, and water-soluble ions in clouds from a tropical montane cloud forest in Puerto Rico. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(27): 4171-4177.