

近 58 年来长江中游雾和霾的演变 特征及其影响因素

陈英英¹ 熊洁² 贾文茜¹ 王明¹ 谭静¹¹

(1. 湖北省气象服务中心, 湖北 武汉 430205;

2. 中国气象局武汉暴雨研究所, 湖北 武汉 430205)

【摘要】: 以 1961~2018 年湖北 72 个国家站的气象观测资料和 NCEP 再分析资料为基础, 采用代表站分类、时序演变、相关性分析等方法, 研究雾和霾的时空分布特征及其影响因素, 结果表明: (1) 湖北地区的雾和霾空间分布不均, 霾多发生在大城市和工业城市, 雾多发生在鄂西南山区; 1980 年前, 雾和霾的年代际变化趋势比较一致, 之后呈反相, 总体上呈现负相关, 2005 年后霾日较雾日明显增加。(2) 城市站与生态站雾日的年变化趋势均是先增加后减少再增加, 由增至减的拐点分别出现在 1980 和 1987 年, 表明城市化进程对雾的生成有影响; 霾日变化趋势基本一致, 空气污染的年际变化无明显的城乡差异。(3) 对于所有站点来说, “区域尺度气候变化、城市化和空气污染(气溶胶污染)”等 3 个因素对雾的定量影响相当; 对于城市站, 城市化的影响明显占主导(55%); 对于生态站, 气溶胶污染的贡献率最高(43%)。

【关键词】: 雾和霾 演变 气候变化 城市化 空气污染

【中图分类号】: X513 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)09-2178-08

近年来, 雾和霾引起的低能见度事件, 日益受到人们的广泛关注。研究发现, 雾的形成不仅受天气条件的作用^[1], 而且对地表类型^[2]和气溶胶特性^[3]也很敏感。

在欧美等发达国家, 随着空气质量的改善, 雾、霾等低能见度事件呈减少趋势^[4,5]。近年来, 我国城市化进程加快, 空气污染日益加剧, 导致我国大部特别是在经济建设迅速发展的地区, 霾日数剧增^[6~10]。而关于雾的变化, 观点不一: Niu 等^[11]表明过去 30 年, 华东地区的冬季雾日数翻了一番; 吴兑等^[12]认为环首都圈近 60 年雾日没有明显的趋势性变化; 更多的研究则表明, 雾日数呈先增后减的趋势^[8,9,13,14]。这说明雾的变化趋势对研究区域、研究时间具有敏感性。

许多研究将雾和霾的变化归因于 3 个影响因素: 气候变化、城市化和空气污染^[9,11,15,16]。首先, 气候变化方面, 可选东亚季风(EAM)作为指标, 它是我国东部地区的一个重要气候系统, 与雾霾等天气事件密切相关。东亚季风较弱时, 地面风较弱、稳定性较强, 有利于雾霾事件的频繁发生^[17]。研究发现, 我国东部地区雾霾的长时间序列变化与其强度呈显著负相关^[11,18]。但 EAM 是一个空间差异较大的气候系统^[18], 不同地区气候特征不同, 会对雾的变化产生不同的影响, 需要分区域计算。

作者简介: 陈英英(1982~), 女, 高级工程师, 主要研究方向为大气物理与大气环境. E-mail: brisk007@163.com
基金项目: 国家重点研发计划项目子课题(2016YFA0601704); 湖北省气象局科技发展基金重点项目(2019Z07)

除气候变化外，雾还是一种局部天气现象，对人类活动敏感^[16]。如城市化通过土地利用、大气变化、温度和湿度的变化对城市气候产生深远的影响^[19]。因此，城市核心区雾最少^[20]，而农村郊区雾最大。大多数学者一致认为，城市热岛 (UHI) 或城市干岛 (UDI) 会减缓雾的形成^[2, 15, 20]。

气溶胶作为凝结核，是影响雾生命史最复杂的因素之一，它具有双重效应：在相对清洁的背景下，大量的气溶胶通过吸收水分产生大量的小雾滴，导致高液态水含量、低能见度、高雾顶和长生命史^[21, 22]，因此，在欧洲和美国等低污染地区，空气质量的改善导致雾的发生减少^[2, 5, 23]。但是，当气溶胶浓度超过一定阈值时，由于强烈的水汽竞争，雾滴浓度降低^[24, 25]。因此，在中国的大城市，严重的空气污染通常会导致雾呈减少趋势^[9, 15]。此外，气溶胶还通过辐射效应改变周围的气温，从而影响雾的生命周期。气溶胶的吸热效应使雾变热，从而延缓了夜间雾的形成，加速了白天雾的消散^[22, 26]。气溶胶的散射效应阻挡了太阳辐射，降低了白天的地表温度，从而导致了雾较长的持续时间和较晚的消散^[15, 27]。

综上，以往的研究工作多是针对气候变化、城市化和空气污染中的某一因素对雾的定性影响进行分析，国内研究重点区域集中在京津冀、长三角及珠三角地区，长江中游鲜有涉及，并且研究时段多结束于 2010 年前后，未能反映近几年的治理成效。本文利用 1961~2018 年 72 个国家站长期观测资料，揭示了位于长江中游的湖北地区雾和霾的年代际变化趋势及空间分布规律，并定量地分离气候变化、城市化和气溶胶三个因素对雾的年代际变化的贡献，揭示雾对这些影响因素的敏感程度。

1 数据和方法

1.1 数据

本文使用的主要数据集是湖北省气象信息与技术保障中心提供的经质量控制后的 72 个国家站的日观测数据集。该数据集包括每天的天气现象记录(雾日、霾日)和每天的平均气温和平均相对湿度数据，时间范围为 1961~2018 年。此数据集通过 CMISS 系统下载。

季风指数利用了 1961~2018 年 NCEP/NCAR 再分析逐月资料，水平分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。数据来源网站 <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>。

1.2 分析区域

长江中游主河道自湖北省宜昌市至江西省九江市湖口，长 955km，考虑到气象观测资料在同一省内的延续性和一致性，选择湖北省内的气象站为代表，分析长江中游流域雾和霾的演变特征，可为长江经济带生态环境的保护与修复提供理论依据；同时，由于湖北地处我国中部，交通区位优势明显，除长江航道外，众多高铁、高速、航线在此交汇，本文中关于雾和霾等低能见度天气的研究也可作为区域综合立体交通气象服务保障提供助力。

1.3 雾和霾的判别

通常雾和霾的识别方法有两种：一种是使用天气现象记录资料^[11]，另一种使用能见度 Vis 和相对湿度 RH 数据判定^[8, 9]。

按照湖北省雾和霾气象观测的历史沿革，2013 年以前是采用人工观测天气现象的方法，2013 年至今，“雾和霾”按以下原则记录和处理^[28]：

(1) 能见度为人工观测时

能见度 $<1.0\text{km}$,相对湿度 $\geq 85\%$ 时记为雾;能见度 $<1.0\text{km}$,相对湿度 $\geq 65\%$ 且 $<85\%$,应根据测站位置、湿度变化、天气条件、方向均匀性等,再结合颜色特征综合判断,按《地面气象观测规范》规定进行记录;能见度 $<10.0\text{km}$,相对湿度 $<65\%$ 时,记为霾。

(2)能见度为自动观测时

雾的能见度判别阈值调整为 0.75km ,霾的能见度判别阈值调整为 7.5km ,其它与(1)一致。

1.4 利用森林覆盖率进行台站的分类

森林植被的差异与城市化关系密切^[29],而森林覆盖率是衡量森林植被的重要指标,因此,本文选择森林覆盖率作为台站分类的依据。根据 2016 年湖北发布的《关于完善县域经济工作考核的意见》,以主体功能区划分为基础,结合产业基础、区位条件和资源禀赋等发展实际,将全省 80 个县(市、区)分为三类,其中第一类县(市、区)22 个,森林覆盖率为 18.6% ;第二类县(市、区)27 个,森林覆盖率为 28.8% ;第三类县(市、区)31 个,森林覆盖率达到 59.5% 。文中将第一、二类县(市、区)定义为城市站(typeA),将第三类县(市、区)定义为生态站(typeB)。

在 76 个有历史气象观测记录的国家站中,有 4 个未在《关于完善县域经济工作考核的意见》中划列,而 80 个县(市、区)中有 8 个无相应的气象观测记录。因此,能够一一对应的只有 72 个站,其中 A 类 43 个、B 类 29 个,所在位置如图 1 所示,可以看出,B 类生态站主要分布在鄂西和鄂东局部山区。

1.5 定量分析影响因子的贡献

如引言所述,影响雾长期变化的 3 个因素是气候变化、城市化和空气污染。为了量化各个因素的贡献,建立多元线性回归模型:雾日= $\text{constant}+a \times x_1+b \times x_2+c \times x_3$ 。

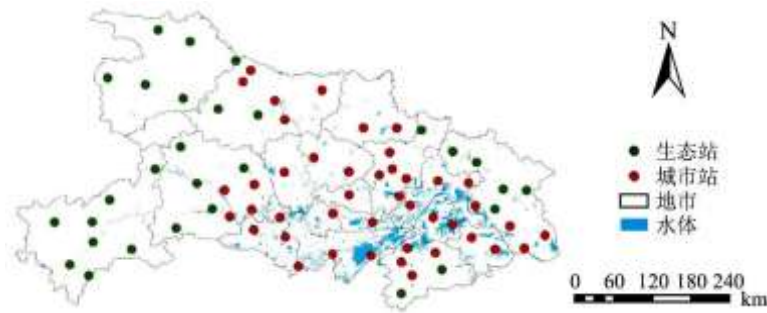


图 143 个城市站和 29 个生态站在湖北的位置及分类

其中 a, b, c 是回归系数, x_1, x_2, x_3 分别是气候变化、城市化和空气污染的指标。这 3 个因素对雾的影响如下:
 $e_1=a \times \Delta x_1, e_2=b \times \Delta x_2, e_3=c \times \Delta x_3$, 其中 Δ 表示标准偏差。因而, 3 个因子的相对贡献如下:

$$|e_1|/(|e_1|+|e_2|+|e_3|) \times 100\%, |e_2|/(|e_1|+|e_2|+|e_3|) \times 100\%, |e_3|/(|e_1|+|e_2|+|e_3|) \times 100\%$$

正(负)贡献表示正(负)相关性。 x_1 代表季风指数, x_2 代表城市站和生态站之间的温度或相对湿度的差异, x_3 代表霾日。其详细推导将在第 2.4.1 至 2.4.3 节中介绍。

2 特征分析

2.1 总体空间分布

图2显示了1961~2018年有气象观测的国家站(72个)雾日和霾日的平均空间分布,采用反距离权重法进行插值。可以看出,雾和霾空间分布不均,雾大部分发生在鄂西南山区,地形效应有利于雾的形成,年均雾日的极大值中心位于咸丰56.1d(29.68° N, 109.15° E)和恩施52.9d(30.29° N, 109.47° E);大城市和工业城市的周边霾发生率高,如宜昌、襄阳、武汉周边。丹江口(32.57° N, 111.52° E)和宜都(30.36° N, 111.43° E)年均霾日最大(65.6d),大冶(30.07° N, 114.88° E)次之,为62.3d。

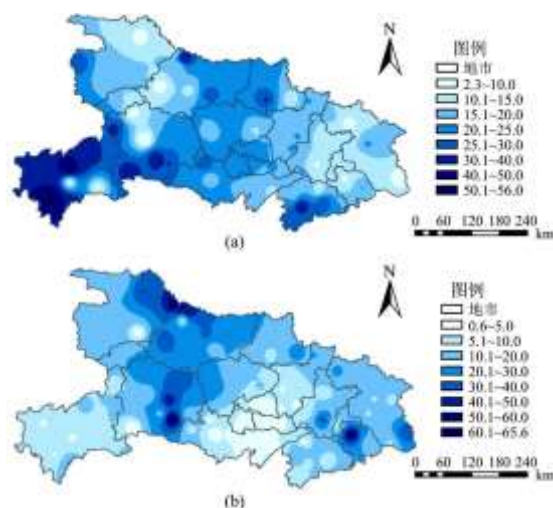


图2 1961~2018年期间72个站平均雾日(a)和霾日(b)的空间分布

2.2 总体时间演变

图3显示了1.4节中计入统计的72个代表站雾日和霾日的年变化特征。可以看出,霾日的年代际变化大于雾日。2013年年霾日最高(59.7d),1964年最低(3.5d);1987年年雾日最高(33.7d),2011年最低(9.2d)。1980~2000年期间,霾日相比1980年前略有减少,2000年以后,霾日迅速增加,在2013年出现一个孤立的峰值,与“当年全国平均雾霾日数为52年来最多^[30]”吻合,这主要受当年的东亚冬季风异常偏弱、500hPa的高压异常抑制了对流的发展、表面风速减弱不利于扩散等气象条件影响^[31]。之后几年又迅速回落,这可能与2013年9月12日,国务院印发《大气污染防治行动计划》中所实施的严格管控措施有关^[32]。而雾日在1987年前稳定增长,之后开始缓慢下降,直至2018年有所反弹,呈先增后减的趋势,拐点发生在1987年。

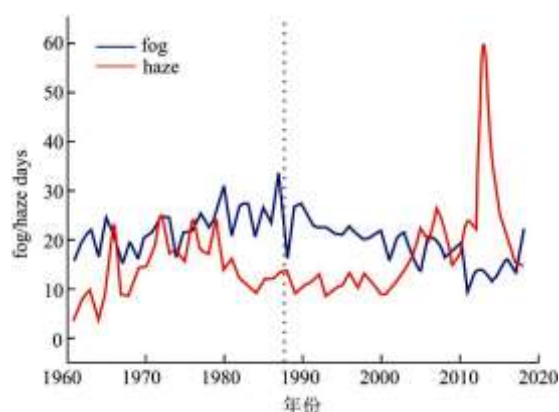


图 3 1961~2018 年雾日和霾日的年变化(灰色虚线是雾日趋势的转折点)

在雾日和霾日的相关关系上,1980 年以前,雾日与霾日变化趋势比较一致(缓慢上升),其后大多呈相反的变化趋势,经统计,72 站年雾日对霾日的相关系数为-0.359,说明总体上湖北地区霾与雾是呈现负相关关系。

2.3 城市站和生态站的时间变化

由于城市站和生态站在城市发展水平上的差异,这两类站点雾和霾的年代际变化可能表现出不同的特征。因此,按照 1.4 节中所述方法将所有站点分为两类进行分析(图 4)。

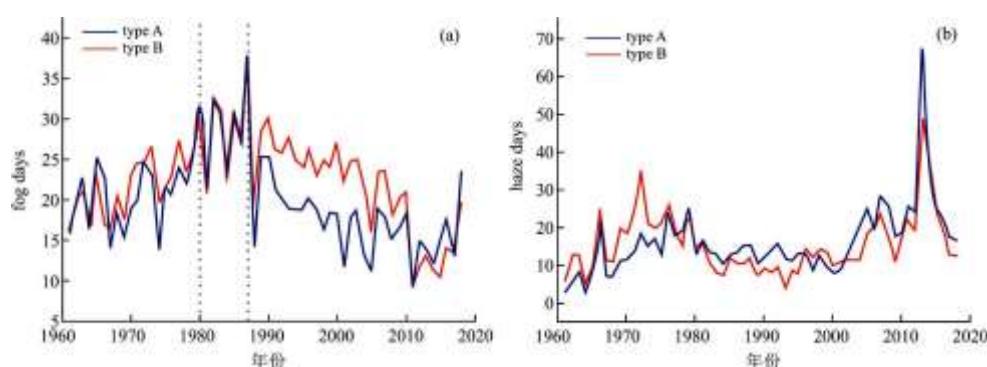


图 4 城市站(蓝色)和生态站(红色)的雾日(a)、霾日(b)的年变化(灰色虚线是雾日趋势的转折点)

从图 4a 可以看出,两类站点的雾日变化趋势显示出类似的特征,均是先增加后减少,2010 年后出现反弹,这一趋势与整个湖北区域的雾日变化趋势相似(图 3)。但是,城市站雾日的拐点(1980 年)比生态站(1987 年)出现得要早,并且在 1980~2010 年,城市站的雾日明显少于生态站,这表明城市发展到一定规模后,城市化效应(UHI 和 UDI)抑制雾的形成,与已有的研究结果一致 [33, 34]。

从图 4b 的对比可以看出,自 1981 年起,城市站霾日总体上略大于生态站,差异不显著,这可能是由于城市化进程加快引发的工业、能源、交通等污染排放相关。两类站点霾日的年代际变化趋势基本一致,尤其在 2013 年都表现出明显的峰值,说明湖北的霾很大程度上可能是由于外来输送或气候原因导致,对城市站和生态站造成同等程度的影响。

2.4 雾的影响因子

本文选取的雾长期趋势的影响因素分别是气候变化、城市化和空气污染,采用 1.5 节所描述的方法分别计算它们对雾变化的定量贡献。本文中的气候变化是指区域尺度气候的变化,不包括与城市化相关的局部尺度气候的变化,它以基本的气象参数(季风指数 MI)来表示;城市化是指由土地表面特征引起的 UHI 和 UDI 效应;空气污染仅限于气溶胶污染,用霾日数来表示^[14]。

2.4.1 气候变化因子

以往的研究表明,雾会受到气候系统(如 EAM)的影响,EAM 的强度可以用季风指数(MI)来表示。定义东亚冬季风强度综合指数 MI 的方法很多,如利用海陆差异类、高压特征类、环流特征类、风场特征类等指数方法^[35]。参照堇道溢^[36]选定西伯利亚高压的覆盖范围,用区域平均的海平面气压值来体现冬季风的强弱。图 5 为湖北地区 1961~2018 年冬季风指数与全年雾日的年变化特征,可以看出,季风指数呈现一个波动的先下降后上升的趋势,与雾日表现出弱的负相关,相关系数为-0.22。说明季风的减

弱可能阻止冷干入侵，促进雾的形成。

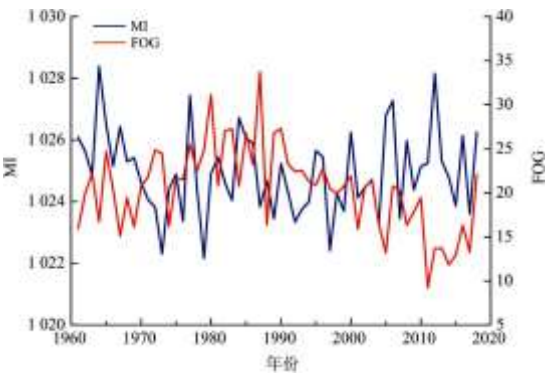


图 5 1961~2018 年冬季风指数与雾日的年变化

2.4.2 城市化因子

研究表明，气温和相对湿度与雾的形成密切相关，而城市化进程对气象因素的影响主要体现在 UHI 效应引起的增热和 UDI 效应引起的减湿，可用年平均气温和年平均相对湿度的演变来进行分析。图 6 显示了城市站和生态站的温度和相对湿度的演变。可以看出从 1961~2018 年，城市站和生态站的气温均呈上升趋势，其中城市站气温上升了约 1.34℃，生态站气温上升了约 0.72℃。相比之下，1990 年后城市站的这种变暖趋势更为明显，这证实了 UHI 效应(图 6a)。以城乡相对温度差(即城市站气温减去生态站气温)作为城市化的变量，分析与雾日的相关性，相关系数为-0.33,说明城市化程度越强，热岛效应越明显，雾日数越少。

从图 6b 可以看出，城市站与生态站的相对湿度变化趋势一致，但 1990 年以前，城市站的湿度总体上大于生态站，1990 年以后，城市相对湿度显著下降，变为总体小于生态站，因此，考虑城市站的相对湿度的减少是由 UDI 效应造成的。以城乡相对湿度差(即城市站湿度减去生态站湿度)作为变量，分析与雾日的相关性，相关系数为 0.34,说明城市化程度越强，干岛效应越明显，雾日数越少。

从相关系数来看，城乡温度差和湿度差均可做为城市化的因子，本文选择城市站和生态站的湿度差作为城市化的影响因子进行分析。

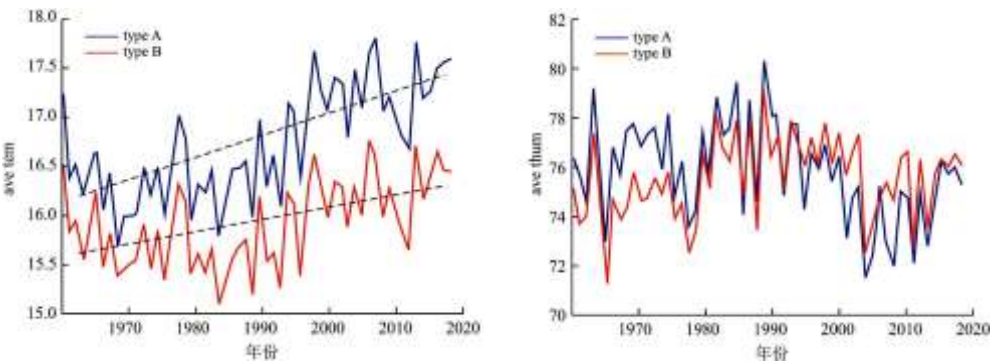


图 6 1961~2018 年城市站和生态站温度(a)和相对湿度(b)的年变化差异

2.4.3 空气污染因子

图7为1971~2008年全省72个站点霾日和雾日之间的逐21年滑动相关系数,可以看出,1977年前为正相关,1978~1986年转为负相关,1987~1993年又变为弱的正相关,1994年开始,相关系数转为负且绝对值呈增大趋势,1998年后相关系数超过-0.43(95%信度检验标准),满足显著相关。说明气溶胶对雾的影响效应随年代发生变化,当空气较为洁净时,气溶胶促进雾的形成;在污染较为严重的背景下,气溶胶反而对雾起到抑制作用。另外,气溶胶组分在不同年代的差异也会对雾的相互作用机制产生不同的影响效果。

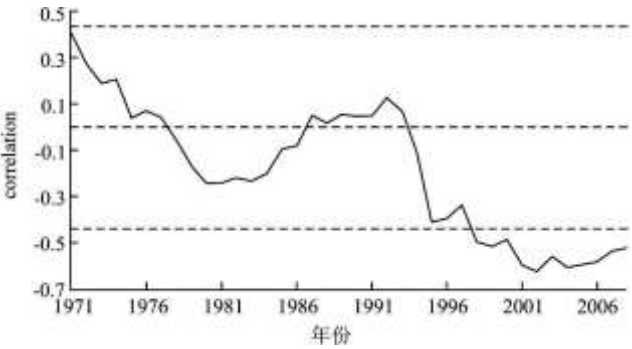


图7 1971~2009年逐年冬季全省72个站点霾日和雾日的21年滑动相关系数

2.4.4 影响因素的各自贡献

对三个因素指标均进行归一化处理, x_1 代表季风指数 MI, x_2 代表城市站 RH 减去生态站 RH, 而 x_3 代表霾日数。按第1.5节所列多元线性回归模型得出: 所有站点的 $\text{constant}=22.451, R^2=0.268$; 城市站点的 $\text{constant}=18.205, R^2=0.239$; 生态站点的 $\text{constant}=27.703, R^2=0.319$ 。

表1显示了这3个因素各自的贡献。可以看出, 气候变化(季风)和空气污染(霾日)与雾日均是负相关, 城市化(湿度差)与雾日是正相关。对于所有站点来说, 3个因素的相对贡献率相当, 分别为30.5%、33.7%、35.8%。而对于城市站来说, x_2 (城市化)的相对贡献明显大于其它两个因素, 占主导地位, 达到55%, 是气候变化因素的1.6倍; 对于生态站来说, 则是 x_3 (空气污染)所占的比重最大, 为45.1%。

表1 不同站点类型气候变化、城市化和空气污染对雾日的相对贡献率(%)

	站点类型	回归系数	标准偏差 Δx	对雾的影响 e	相对贡献率
气候变化(季风)	所有站点	-5.667	0.22	-1.247	30.5
	城市站	-3.628	0.22	-0.798	23.8
	生态站	-8.95	0.22	-1.969	34.2
城市化(湿度差)	所有站点	5.314	0.26	1.382	33.7
	城市站	7.103	0.26	1.847	55
	生态站	4.576	0.26	1.19	20.7

空气污染(霾日)	所有站点	-9.774	0.15	-1.466	35.8
	城市站	-4.769	0.15	-0.715	21.3
	生态站	-14.391	0.18	-2.59	45.1

3 结论与讨论

本文利用 1961~2018 年的气象观测资料,研究了湖北地区雾和霾的长期变化特征,量化了气候变化、城市化和空气污染(气溶胶污染)对区域雾变化的各自贡献。结果表明:

(1)湖北地区的霾多发生在大城市和工业城市,而雾大多发生在鄂西南山区。1980 年以前,雾日与霾日变化趋势比较一致,之后呈反相,2005 以来霾日明显较雾日增加。

(2)城市站和生态站的雾日变化趋势均是先增加后减少,近年又出现反弹,由增至减的拐点分别为 1980 和 1987 年。表明城市化导致的热岛(UHI)和干岛(UDI)效应抑制了雾形成,其转折点的差异在 7 年左右。城市站和生态站的霾日变化趋势基本一致,没有明显的定量差异。

(3)进一步将湖北地区长期雾的变化归因于 3 个因素:区域尺度气候变化、城市化和空气污染(气溶胶污染)。定量分析表明,对于所有站点来说,3 个因子的影响相当;而对于城市站,城市化的影响明显占主导(55%);对于生态站来说,气溶胶污染的贡献率最高(43%)。

需要指出,本文重点研究的是这 3 个因素对雾的最直接影响,暂不能仅利用观测数据完全分离它们之间的复杂关联。然而,这 3 种影响因素之间是存在相互作用的,例如有学者认为季风等气候系统会影响气溶胶的时空分布;气溶胶通过一系列直接和间接效应,也会对气候变化产生影响^[37],这是本文的一个局限。尽管存在这一限制,仍可以揭示湖北地区雾变化对这 3 个因素的敏感性,在今后的工作中,需要全球或区域模型来深入研究这 3 个因素对雾变化的交互作用。

参考文献:

- [1]GULTEPE I,TARDIF R,MICHAELIDES S,et al.Fog research:A review of past achievements and future perspectives[J].Pure and Applied Geophysics,2007,164(6-7):1121-1159.
- [2]LADOCHY S.The disappearance of dense fog in Los Angeles:Another urban impact?[J].Physical Geography,2005,26(3):177-191.
- [3]BOUTLE I,PRICE J,KUDZOTSA I,et al.Aerosol-fog interaction and the transition to well-mixed radiation fog[J].Atmospheric Chemistry and Physics,2018,18(11):7827-7840.
- [4]DOYLE M,DORLING S.Visibility trends in the UK 1950-1997[J].Atmospheric Environment,2002,36(19):3161-3172.
- [5]VAUTARD R,YIOU P,OLDENBORGH G.Decline of fog,mist and haze in Europe over the past 30 years[J].Nature Geoscience,2009,2(2):115-119.

-
- [6]CHE H, ZHANG X, YANG Y, et al. Haze trends over the capital cities of 31 provinces in China, 1981–2005[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2009, 97(3–4):235–242.
- [7]DENG X, TIE X, WU D, et al. Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta (PRD) region, China[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(7):1424–1435.
- [8]DING Y, LIU Y. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity[J]. Science China:Earth Sciences, 2014, 57(1):36–46.
- [9]郭婷, 朱彬, 康志明, 等. 1960~2012 年长江三角洲地区雾日与霾日的气候特征及其影响因素[J]. 中国环境科学, 2016, 36(4):961–969.
- [10]吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 1951–2005 年中国大陆霾的时空变化[J]. 气象学报, 2010, 68(5):680–688.
- [11]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[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres, 2010a, 115(D7).
- [12]吴兑, 廖碧婷, 吴蒙, 等. 环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件[J]. 环境科学学报, 2014, 34(1):1–11.
- [13]孙戡, 马振峰, 牛涛, 等. 最近 40 年中国雾日数和霾日数的气候变化特征[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(3):397–406.
- [14]QUAN J, ZHANG Q, HE H, et al. Analysis of the formation of fog and haze in North China Plain (NCP) [J]. Atmospheric Chemistry Physics, 2011, 11(4):11911–11937.
- [15]SHI C, ROTH M, ZHANG H, et al. Impacts of urbanization on long-term fog variation in Anhui Province, China[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(36):8484–8492.
- [16]朱彬, 郭婷. 空气污染对雾影响的研究进展[J]. 气象科技进展, 2016, 6(2):56–63.
- [17]ZHANG R, QIANG L, ZHANG R. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013[J]. Science China:Earth Sciences, 2014, 57(1):26–35.
- [18]LI Z, LAU W, RAMANATHAN V, et al. Aerosol and monsoon climate interactions over Asia[J]. Reviews of Geophysics, 2016b, 54(4):866–929.
- [19]NIU S, LU C, YU H, et al. Fog research in China: An overview[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2010b, 27(3):639–662.
- [20]SACHWEH M, KOEPKE P. Fog dynamics in an urbanized area[J]. Theoretical and Applied Climatology, 1997, 58(1–2):87–93.

-
- [21]KOKKOLA H,ROMAKKANIEMI S, LAAKSONEN A.On the formation of radiation fogs under heavily polluted conditions [J].Atmospheric Chemistry and Physics,2003,3(3):581-589.
- [22]MAALICK Z,KÜHN T,KORHONEN H,et al.Effect of aerosol concentration and absorbing aerosol on the radiation fog life cycle[J].Atmospheric Environment,2016,133:26-33.
- [23]WITIWI M,LADOCHY S.Trends in fog frequencies in the Los Angeles basin[J].Atmospheric Research,2008,87(3-4):293-300.
- [24]RANGOGNIO J,TULET P,BERGOT T,et al.Influence of aerosols on the formation and development of radiation fog[J].Atmospheric Chemistry and Physics,2009,9(5):17963-18019.
- [25]ROSENFELD D,LOHMANN U,RAGA G,et al.Flood or drought:How do aerosols affect precipitation?[J].Science,2008,321(5894):1309-1313.
- [26]BOTT A.On the influence of the physico-chemical properties of aerosols on the life cycle of radiation fogs[J].Journal of Aerosol Science,1990,21(1):279-282.
- [27]李子华,杨军,黄世鸿.考虑湿度影响的城市气溶胶粒子白天温度效应[J].大气科学,2000,24(1):87-94.
- [28]鄂气测函[2014]8号《观测处关于调整霾观测判别标准和加强相关观测对比分析评估工作的通知》.
- [29]张金屯,Picket S.城市化对森林植被、土壤和景观的影响[J].生态学报,1999,19(5):654-658.
- [30]中国气象局.2013 年我国平均雾霾日数 52 年来最多[EB/OL].(2013-11-01)[2020-03-30]http://www.gov.cn/jrzq/2013-11/01/content_2519820.htm.
- [31]张人禾,李强,张若楠.2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J].中国科学:地球科学,2014,44(1):27-36.
- [32]中国科学院“大气灰霾成因与控制”专项总体组,“大气十条”实施以来京津冀 PM_{2.5} 控制效果评估报告[J].中国科学院院刊,2015,30(5):668-678.
- [33]周淑贞,郑景春.上海城市对雾的影响[J].气象学报,1987,45(3):366-369.
- [34]石春娥,杨军,邱明燕,等.从雾的气候变化看城市发展对雾的影响[J].气候与环境研究,2008,13(3):327-336.
- [35]邵鹏程,李栋梁.东亚季风指数的分类和比较[J].气象科学,2012,32(2):226-235.
- [36]龚道溢,朱锦红,王邵武.西伯利亚高压对亚洲大陆的气候影响分析[J].高原气象,2002,21(1):8-14.
- [37]王东东,朱彬,江志红,等.人为气溶胶对中国东部冬季风影响的模拟研究[J].大气科学学报,2017,40(4):541-552.