



论文

华北黄淮地区冬季雾和霾的时空气候变化特征

尹志聪^{①②}, 王会军^{①③*}, 郭文利^②

① 中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029;

② 北京市气象局, 北京 100089;

③ 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029

* 联系人, E-mail: wanghj@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2014-09-13; 接受日期: 2014-12-16; 网络版发表日期: 2015-04-22

国家自然科学基金项目(批准号: 41130103, 41210007)资助

摘要 揭示了华北黄淮不同等级雾和霾的气候变化特征, 指出霾易发期由冬季转变为全年, 冬季霾日数明显上升. 雾日数为霾的一半, 不同等级雾的日数和趋势差别不大. 20 世纪 80 年代之前, 雾和霾日数没有明显相关, 但之后表现出显著正相关. 雾的空间尺度较大, 呈南多北少的分布特征, 而霾主要发生在大城市周围, 呈离散式分布. 在东亚冬季风减弱和颗粒物充足的大背景下, 霾天气与风力之间的负相关明显减弱, 而与水汽条件(降水和湿度)的正相关明显加强. 近些年, 由于冬季风减弱, 小风速常常出现, 且风速变率减小, 同时, 气溶胶粒子有稳定的排放源和较强的吸湿性, 水汽条件开始成为霾、尤其是能见度更低的湿霾天气发生的关键控制因子之一. 与此不同, 雾日数和降水量和相对湿度之间一直保持稳定的正相关关系, 和风力的负相关也不太显著.

关键词
霾
雾
能见度
气候变化
气象条件

近些年来, 全国各地雾(本文将地面观测规范中的“雾与轻雾”简称为“雾”)和霾频发、重发, 不仅对交通、旅游等行业产生不利影响, 更引起全国人民对身体健康的忧虑. 各级政府也积极响应, 纷纷制定大气污染防治条例或空气清洁计划. 但是在2005年之前, 我国对霾的系统性研究不多, 甚至对霾的观测都没有足够重视. 雾的研究比霾要多一些, 但也主要集中在单次雾天气过程的诊断和模拟. 随着雾和霾现象的加重, 逐渐被归入严重的灾害性天气当中, 受到的关注和研究也多了起来, 一些比较重要的特征被揭示出来. 吴兑等(2010, 2011)指出1951~2005年中国城市区域, 尤其是华北、黄淮和江淮地区的霾有显著增加, 而北方重工业城市的雾(轻雾)日数无明显趋势性

变化, 主要表现为年际和年代际变化. 高歌(2008)和宋连春等(2013)也指出我国东部大部分霾多发区域的霾日数呈增加趋势, 如河南西部等. 孙彧等(2013)对1971~2010年中国霾和雾日数的研究也得出了相似的结论. 能见度下降、雾和霾多发的原因可能包括气溶胶增加和天气气候变化等(Che等, 2007).

针对重点区域雾和霾的变化趋势和成因, 一些科学家进行了专门的讨论. Che等(2009)采用消光系数为指标, 对全国31个省会城市霾的变化趋势进行研究, 发现北京、石家庄、济南和太原有相似的趋势, 并指出可能受到人为活动的强烈影响. Zhao等(2011)对京津冀的能见度进行了细致的诊断分析, 发现乡镇的能见度明显高于城市, 能见度和PM_{2.5}的浓度呈

中文引用格式: 尹志聪, 王会军, 郭文利. 2015. 华北黄淮地区冬季雾和霾的时空气候变化特征. 中国科学: 地球科学, 45: 649–655

英文引用格式: Yin Z C, Wang H J, Guo W L. 2015. Climatic change features of fog and haze in winter over North China and Huang-huai Area. Science China: Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-015-5089-3

反相关关系. 王喜全等(2013)认为京津冀平原灰霾天气有明显的年代演变特征, 并提出20世纪90年代以来京津冀平原地区灰霾天气剧增, 可能是一个综合结果, 既受PM_{2.5}浓度增加对能见度的影响, 冷空气活动减弱也是不容忽视的因素. 前期秋季北极海冰的减少加强了中国东部的霾污染, 是一个显著的短期气候预测信号(Wang等, 2015).

本文将针对华北和黄淮区域冬季雾和霾天气的气候特征进行讨论, 文中将首次使用1天4次的观测资料重构1961~2012年雾和霾的气候序列, 并对对比分析不同等级雾和霾的时空气候变化特征. 最后, 还讨论了雾和霾与气候条件的相关性, 力求找出污染物排放之外的控制因子, 为雾和霾的治理和短期气候预测提供科学支撑.

1 资料与方法

目前, 国内外对雾和霾, 尤其是霾气候资料的处理方法主要有三种: (1) 直接使用天气现象观测代码(高歌, 2008; 宋连春等, 2013); (2) 使用能见度和相对湿度的日均值重建气候序列, 日均相对湿度90%区别雾和霾(吴兑等, 2010, 2011); (3) 使用14时实测值重建气候序列, 相对湿度90%区别雾和霾(Schichtel等, 2001; Doyle和Dorling, 2002). 经过对比分析发现三种方法各有利弊: (1) 2000年之前, 各地观测员对霾的观测原则存在很大的差异, 所以在气候研究中一般不直接使用天气现象代码; (2) 90%的日均相对湿度很难达到, 在主观上增多了霾, 减少了雾; (3) 14时能见度和相对湿度观测数据是国际上常用的方法, 可以避免清晨逆温和光线对自动能见度观测仪的影响. 但是中国在2012年之前的能见度为人工观测, 且雾和霾灾害严重, 在1天的任何时次都有可能发生.

经过对1961~2012年中国地面定时观测中02, 08, 14和20点的数据进行缺测检验、迁站合并, 选取雾和霾灾害严重的华北和黄淮部分地区的共78个站点为代表站, 具体范围是(31°~44°N, 109°~119°E). 经检验, 选取的站点分布均匀(图略)、质量可靠. 对雾和霾的气候资料进行重建的方法为能见度小于10 km, 排除降水、吹雪、扬沙、沙尘暴和浮尘等影响能见度的天气现象, 相对湿度小于(大于)90%则认为有霾(雾)发生. 一天中任何时次有霾(雾)发生, 则定义为1个霾(雾)日.

1980年, 国家地面观测规范对能见度的观测提出了新的要求, 从等级报文升级为具体数值报文(李雄, 2010). 1961~1979年, 能见度分为0~9共10个等级, 没有具体数值, 也不能反算出具体数值. 1980年之后的能见度均为具体数据, 精度0.1 km. 因此在建立长期气候序列时, 需要将1980年之后的数据转换为等级. 在确定4个等级的划分原则时, 既考虑了1961~1979年的等级节点特征, 又兼顾了近些年的标准规范. 将能见度分为4个等级, 相应的雾和霾也划分为4个等级(表1).

2 雾和霾的时间变化

图1给出了1961~2012年雾和霾总日数, 霾日数, 雾日数以及雾-霾同发日数. 总体看来, 20世纪80年代之前, 雾和霾总日数处于快速上升趋势, 1973年前后发生突变(M-K检验, 图略). 80年代之后, 雾和霾总日数变化不大, 2005年之后又轻微的减少. 与之相似, 霾日数在80年代之前有明显的上升趋势, 80年代之后上升趋势减弱, 1973年前后也发生了突变(M-K检验, 图略). 雾日数是霾日数的一半, 在80年代之前呈现增加趋势, 80年代之后变为减少. 也就是说, 80年代之后, 雾和霾的总日数并没有明显的变化, 但是雾日数下降, 霾日数增加. 雾-霾同发日数为一天内既有雾, 又有霾发生的日数, 在某种程度上表明雾、霾相互转换的情况. 1981~2005年, 雾和霾之间的转换比较频繁, 2005年之后雾-霾同发日数减少, 相互之间的转换有所减弱(丁一汇和柳艳菊, 2014).

由图1的逐月变化曲线可以发现, 霾日数的月际变化越来越不明显, 雾日数则一直保持明显的月际变化. 由两者的月际变化方差(图略)和图2可以发现霾从1993年开始逐渐由冬季易发变为全年易发, 月际差异减小, 平均每月有10~15天的霾. 而雾日数的月际和季节变化没有显著的变化, 一直是夏天易发, 8月份最多, 有接近10天雾日, 冬季每月有5个左右的雾日.

表1 气候序列中雾和霾的等级标准

等级	能见度数值(km)	1961~1979年对应等级
Lv1 (轻微)	4~10	6
Lv2 (轻中度)	2~4	5
Lv3 (重度)	1~2	4
Lv4 (极重度)	<1	0~3

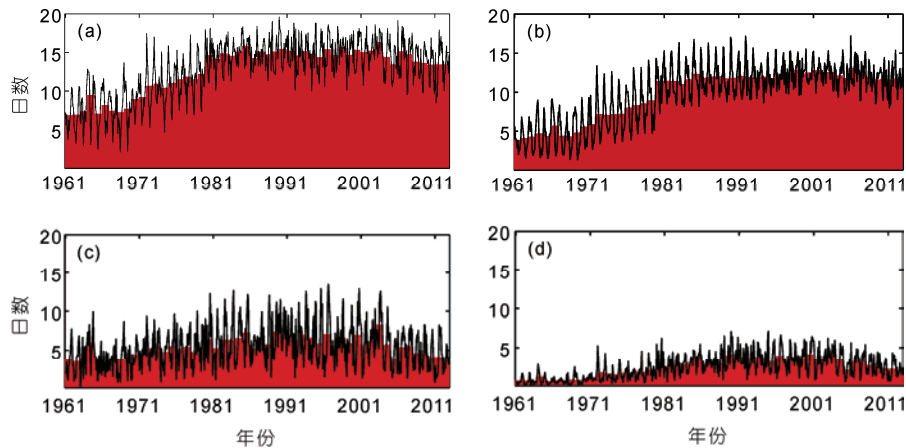


图1 1961~2012年逐月(曲线)和年平均(柱形)的雾和霾(a)、霾(b)、雾(c)以及雾-霾同发(d)日数

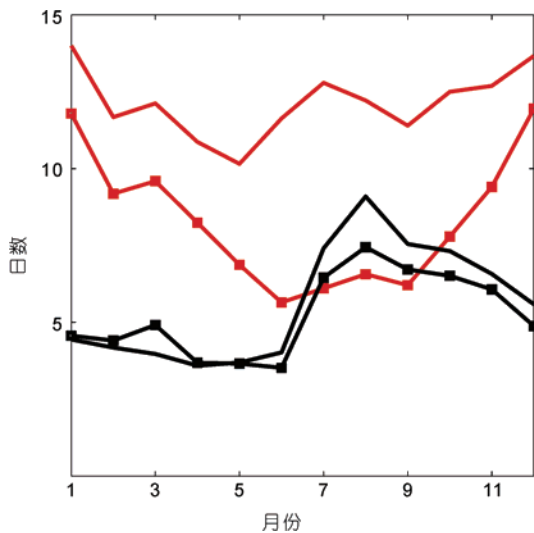


图2 霾和雾日数的逐月变化

方框示 1961~1992 年平均; 光滑示 1993~2012 年平均; 红色示霾; 黑色示雾

3 冬季雾和霾的空间分布

冬季雾和霾的空间分布(图3)表现出明显的差异, 雾的空间尺度比较大, 为明显的南多北少形态, 河北以南冬季有超过20天雾日, 以北则少于10天. 霾主要在大城市旁边聚集, 如京津冀、郑州、济南、太原和西安周围都有超过40天的霾日, 中小城市周围和内蒙古中部的霾日较少. 以年际变率较大的省会城市与78个站点求单点相关系数, 其空间分布(图4)也反映出霾围绕大城市和雾大尺度均匀分布的特点, 能够在一定程度上反映出雾和霾形成机制的差别. 近些年, 霾主要由细颗粒物组成, 空间分布和污染源有密切的关系, 雾则有大量的小水滴组成, 空间分布更多

的受天气系统影响. 霾的单点相关系数表现为明显的两块正、负区域, 内蒙古和陕西为显著负相关区域, 其他地区均为显著的正相关, 两块区域的霾日数有不同的变化趋势.

从114°~118°E的纬度-时间剖面图(图5和6)可以发现京津冀南北方向上更多详细的特征: (1) 霾天气存在三个高值带: 京津冀, 34°~36°N和33°N以南; (2) 京津冀地区最早出现较频繁的霾天气, 从1961年开始轻微霾日数即超过25天, 1980年开始超过35天, 2000年开始超过45天. 2000年之前, Lv2~4等级的霾天气主要出现在京津冀地区, 但之后略有下降. (3) 34°~36°N, 轻微霾自1970年开始增多, 80年代轻微霾超过55天, 轻中度霾也有类似的趋势, 但日数明显较少, 重度和极重度霾则一直较少. (4) 33°N以南地区的霾出现较晚, 但迅速加重, 尤其是2000年之后轻中度和重度霾出现快速增长.

与霾相比, 雾的变化特征比较简单, 表现为南多北少, 南北同步和近几年明显减少等特征, 年际和年代际变化也比霾要清晰一些. 需要注意的是极重度雾的日数南北差异很小, 甚至北方还要略多一些, 其机制需要深入研究.

4 冬季雾和霾的特性转变

将研究区域凝练到雾和霾的正相关区域内(31°~42°N, 111°~119°E), 仔细讨论时间变化特征. 冬季不同等级的霾表现出不同的变化特征(图7(a)): (1) 1961~1980年, 轻微霾日数明显增多, 1981~2000年轻微霾日数稳定保持在35天左右, 之后略有下降.

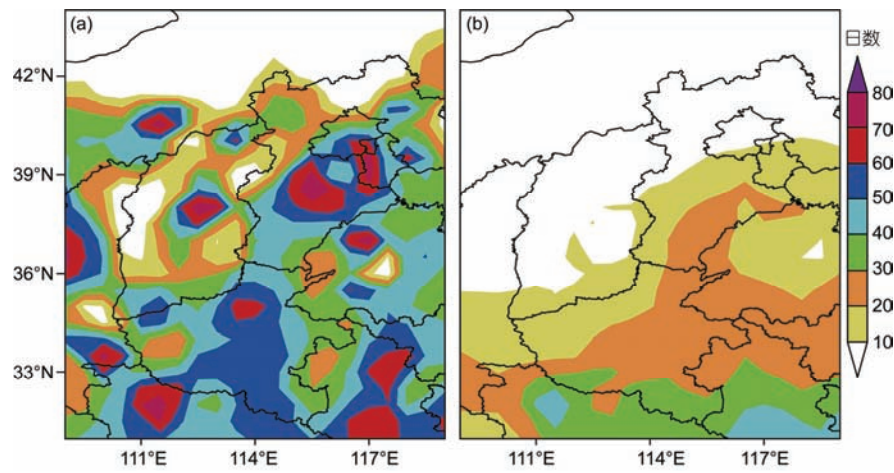


图3 1961~2012年冬季霾(a)和雾(b)日数

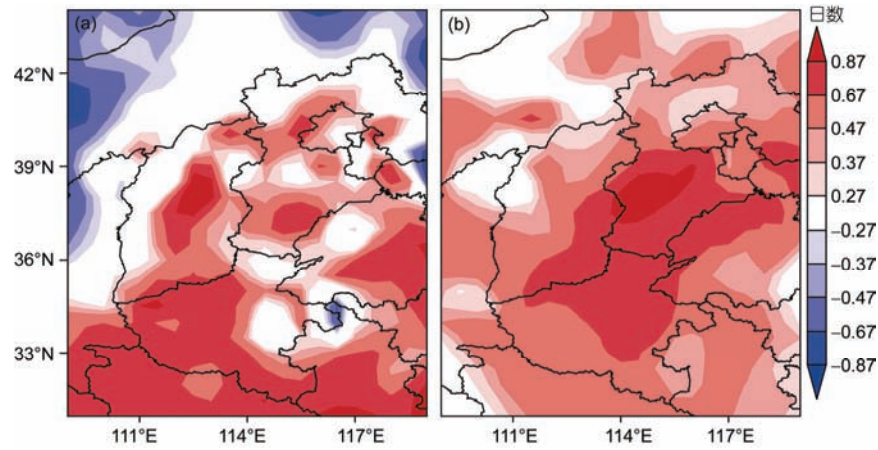


图4 1961~2012年冬季太原霾(a)和石家庄雾(b)日数的单点相关系数

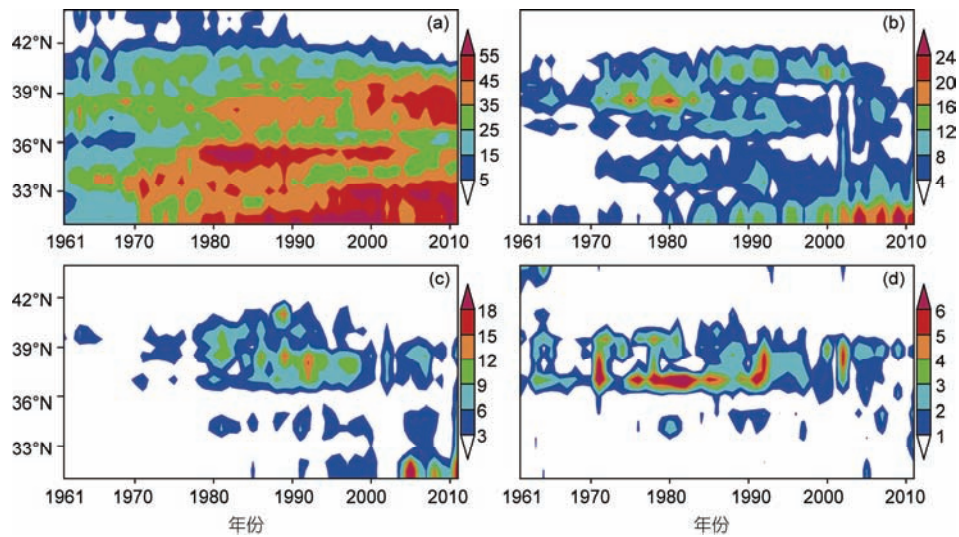


图5 1961~2012年冬季(114°~118°E 平均)不同等级霾日数的纬度-时间剖面图

(a) 轻微; (b) 轻中; (c) 重度 (d) 极重度

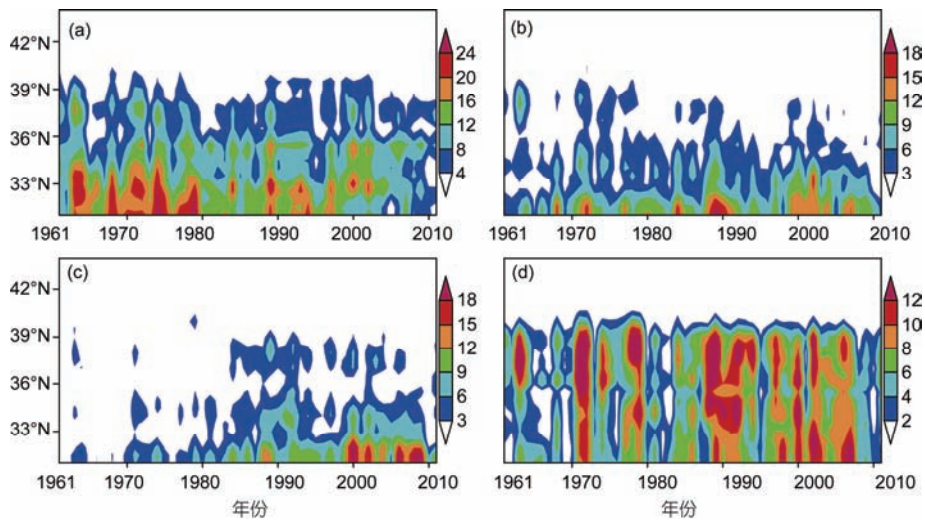


图6 1961~2012年冬季(114°~118°E 平均)不同等级雾日数的纬度-时间剖面图

(a) 轻微; (b) 轻中; (c) 重度; (d) 极重度

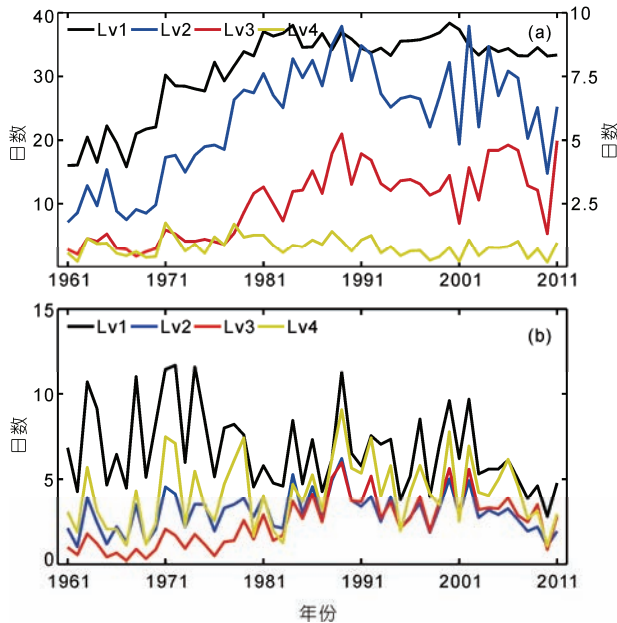


图7 1961~2012年冬季霾(a)、雾(b)日数

(a) 中轻微霾对应左侧纵轴, 其他三个等级霾对应右侧纵轴

(2) 1961~1990年, 轻中度霾总体趋势和轻微霾日数基本一致, 但是在1990~2000年轻中度霾日数下降到6天左右, 2000年之后再度增加, 年际变化也增强了。(3) 重度霾在1980年和2000年左右有两次明显的增加, 2000年之后重度霾日数大约在5天左右。(4) 极重度霾日数一直比较稳定, 每年冬季1天左右。

冬季不同等级雾日数的差别不像霾那么明显, 变化趋势也比较一致, 比较明显的特征有: (1) 近10

年, 不同等级雾日数均有明显下降。(2) 雾日数的年际变化比较明显。(3) 轻中度和重度雾日数年代际变化明显, 1961~1980年持续负距平, 1981~2000年持续正距平, 之后又表现为持续的负距平。20世纪80年代之前, 雾日数和霾日数之间没有明显的相关(图8), 是两种界限明显的天气现象; 80年代之后, 两者表现出显著的正相关关系, 超过95%信度。相关性的变化和雾-霾同发日数(图1(d))吻合的较好, 说明80年代开始雾和霾的界限开始变的模糊起来, 同一天内雾和霾频繁转换。

从图9(a)可以看出, 虽然能源消耗(或污染物排放)对霾的形成有很大的促进作用, 但霾日数并没有单调的随着能源消耗的增加而增加, 1980年以后依然表现出明显的年际变化。1961~2012年, 东亚冬季风指数(王会军和贺圣平, 2012)和霾日数之间的相关系数为-0.52, 超过99%的置信水平, 表明东亚冬季风越弱越有利于霾的发生(图9(b))。这往往通过与东亚冬季风相关的地面风、相对湿度和降雨等气象条件表现出来。

华北和黄淮冬季地面风力表现为持续性的下降, 近10年降水量和相对湿度也有明显下降(图略)。图10(a)给出的是1961~2012年冬季霾日数与降雨量、相对湿度和风力之间的20年滑动相关系数, 有两个显著不同的相关阶段: (1) 20世纪80年代之前霾日数与风力呈显著的负相关, 即风力越小, 霾日数越多。(2) 80年代之后, 霾日数与风力的关系开始变得不明显, 但与降水量和相对湿度呈显著的正相关, 即降水量

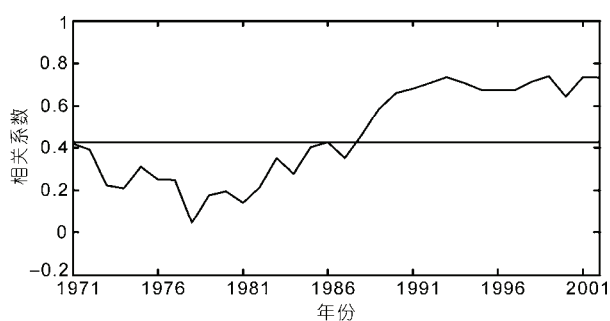


图8 1961~2012年冬季霾和雾日数之间的20年滑动相关系数

横线上方表示达到95%信度的水平

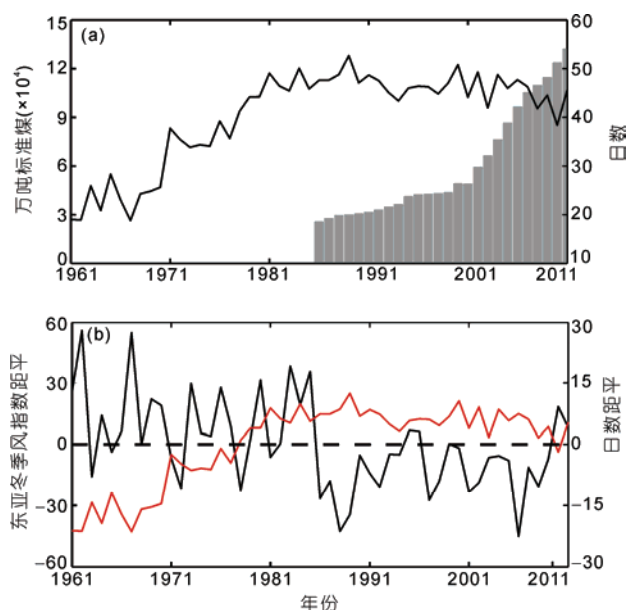


图9 霾日数(曲线)与1986~2012华北黄淮能源总消费量(柱形,万吨标准煤)(a)和霾日数(红色)与东亚冬季风指数(黑色)(b)图

越多、相对湿度越大,霾日数越多。如图11(a)所示,霾发生时的相对湿度一直处于上升趋势,2006年之后略有下降。60年代为40%左右,2000年上升到55%左右,这可能是霾性质发生变化的结果。改革开放之前,霾主要由灰尘、干粉尘等组成,干燥的环境一般有利于提供霾天气的粉尘源。风速小,扩散条件不利的情况下,霾就有可能发生。中国经济建设蓬勃发展的同时,也向大气排放了大量的硫酸盐、硝酸盐和有机碳氢化物等气溶胶粒子,这类气溶胶粒子有稳定的排放源和较强的吸湿性,当风速小,扩散条件不利时,气溶胶粒子快速吸湿增长,降低能见度,发生霾现象。同时,由图11(b)可以发现,霾对小风速环境的

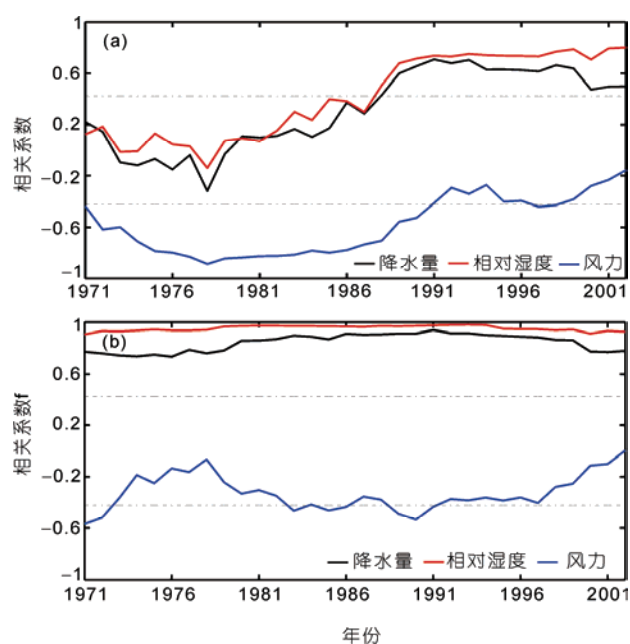


图10 1961~2012年冬季霾日数、雾日数的降雨量、相对湿度和风力之间的20年滑动相关系数

(a) 霾日数; (b) 雾日数。横虚线标示范围达到95%信度的水平

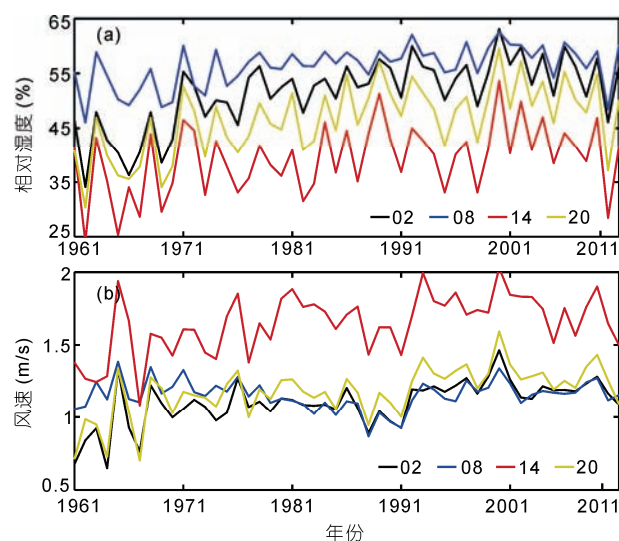


图11 1961~2012年冬季发生霾天气时的相对湿度(a)和风力(b)图

依赖性在降低。一般来说,降水量增多对霾天气的促进作用是间接的。降雨(雪)之前,天气形势稳定,地面风速小,而湿度明显增加,这正是霾天气发生的最有利条件。降雨(雪)之后,如果没有明显冷空气,湿度维持将会引发雾天。在当前排放水平下,降水之后污染物将会迅速恢复到较高的水平,如果雾没有及

时散去, 也易转换为湿霾.

雾日数和降水量(相对湿度)之间一直保持稳定的正相关关系, 和风力之间有负相关关系, 但有时不太显著. 降雨(雪)后, 天气转晴, 水分蒸发, 使近地面层空气接近饱和, 地面的长波辐射冷却作用常常促使雾的形成. 即使没有降雨(雪), 相对湿度大也是雾天气发生的一个重要有利条件. 一般情况下, 小风速也是有利于雾发生的气象条件.

5 讨论与结论

本文通过对气候序列进行重建, 揭示了华北和黄淮不同等级雾和霾的气候变化特征, 指出霾由冬季易发转变为全年易发, 冬季霾日数有较为明显的上升趋势. 雾日数基本为霾日数的一半, 不同等级雾的日数和趋势差别不大. 20世纪80年代之前, 雾日数和霾日数之间没有明显的相关性, 之后两者表现出显著的正相关. 雾的空间尺度较大, 呈南多北少的分布特征, 而霾主要发生在大城市周围, 呈离散式分布. 不同霾聚集区的变化特征也不同, 京津冀从1961年开始已经有较频繁的霾. 33°N以南地区的霾出现较晚, 但2000年之后轻中度和重度霾出现快速增长.

1961~2012年冬季霾日数有两个显著不同的阶段: (1) 20世纪80年代之前霾日数与风力呈显著的负相关; (2) 20世纪80年代之后, 霾日数与风力的关系开始变得不明显, 但与降水量和相对湿度呈显著的

正相关. 近些年, 由于冬季风减弱, 小风速常常出现, 且风速变率减小. 同时, 气溶胶粒子有稳定的排放源和较强的吸湿性, 水汽条件开始成为霾, 尤其是能见度更低的湿霾天气发生的关键控制因子之一. 雾日数和降水量和相对湿度之间一直保持稳定的正相关关系, 和风力的负相关关系也不太明显.

雾和霾不仅属于低能见度现象的两种不同表征, 变化特征和形成机理也存在显著差异, 需要分别进行细致的研究. 尤其是, 在研究霾天气的控制因子时, 需要划分为两个不同的阶段进行讨论, 其与ENSO和东亚冬季风关系在20世纪70年代中期减弱(王会军和贺圣平, 2012), 及冬季风本身的减弱(王会军和范可, 2013; 张人禾等, 2014)和低频振荡之间是否存在一定的相关性也是值得讨论的题目. 北极涛动作为北半球中高纬大气环流的一个主要模态对东亚的各种气候的形成有重要的影响, 它是否也对冬季雾和霾的形成有显著的影响也将是下一步研究的重点.

除天气气候条件外, 影响雾和霾分布和趋势变化的原因还包括: (1) 城市化发展导致近地面风速减小, 边界层厚度增加及逆温层变化等; (2) 工业发展引起的污染源排放和二次污染等; (3) 政策性调整, 如2008年奥运, 北京煤改气, 大气污染防治等. 这些原因和天气气候条件共同调控着雾和霾的空间分布和时间趋势, 他们之间是如何相互作用的, 如何评估各自的比重(王自发等, 2014)等都是值得探讨的问题.

参考文献

- 丁一汇, 柳艳菊. 2014. 近50年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系. 中国科学: 地球科学, 44: 37–48
- 高歌. 2008. 1961~2005年中国霾日气候特征及变化分析. 地理学报, 63: 761–768
- 李雄. 2010. 1980年地面气象观测规范变更对能见度资料连续性影响研究. 气象, 36: 117–122
- 宋连春, 高荣, 李莹, 等. 2013. 1961~2012年中国冬半年霾日数的变化特征及气候成因分析. 气候变化研究进展, 9: 313–318
- 孙斌, 马振峰, 牛涛. 2013. 最近40年中国雾日数和霾日数的气候变化特征. 气候与环境研究, 18: 397–406
- 王会军, 贺圣平. 2012. ENSO和东亚冬季风之关系在20世纪70年代中期之后的减弱. 科学通报, 57: 1713–1718
- 王会军, 范可. 2013. 东亚季风近几十年来的主要变化特征. 大气科学, 37: 313–318
- 王喜全, 孙明生, 杨婷, 等. 2013. 京津冀平原地区灰霾天气的年代变化. 气候与环境研究, 18: 165–170
- 王自发, 李杰, 王哲, 等. 2014. 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, 44: 3–14
- 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 2010. 1951~2005年中国大陆霾的时空变化. 气象学报, 68: 680–688
- 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 2011. 中国大陆1951~2005年雾与轻雾的长期变化. 热带气象学报, 2: 145–151
- 张人禾, 李强, 张若楠. 2014. 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. 中国科学: 地球科学, 44: 27–36
- Che H Z, Zhang X Y, Li Y, et al. 2009. Haze trends over the capital cities of 31 provinces in China, 1981–2005. Theor Appl Climatol, 97: 235–242
- Che H Z, Zhang X Y, Li Y, et al. 2007. Horizontal visibility trends in China 1981–2005. Geophys Res Lett, 34: L24706
- Doyle M, Dorling S. 2002. Visibility trends in the UK 1950–1997. Atmos Environ, 36: 3161–3172
- Schichtel B A, Husar R B, Falke S R, et al. 2001. Haze trends over the United States, 1980–1995. Atmos Environ, 35: 5205–5210
- Wang H J, Chen H P, Liu J P. 2015. Arctic sea ice decline intensified haze pollution in eastern China. Atmos Oceanic Sci Lett, 8: 1–9
- Zhao P S, Zhang X L, Xu X F, et al. 2011. Long-term visibility trends and characteristics in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China. Atmos Res, 101: 711–718