

中国中东部冬季霾日的形成与东亚冬季风和大气湿度的关系^{*1}

吴萍^{1,2,3} 丁一汇³ 柳艳菊³ 李修仓³
WU Ping^{1,2,3} DING Yihui³ LIU Yanju³ LI Xiucang³

1. 中国气象科学研究院, 北京, 100081

2. 南京信息工程大学大气科学学院, 南京, 210044

3. 中国气象局国家气候中心, 北京, 100081

1. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2. *College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*

3. *National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China*

2015-11-30 收稿, 2016-03-15 改回.

吴萍, 丁一汇, 柳艳菊, 李修仓. 2016. 中国中东部冬季霾日的形成与东亚冬季风和大气湿度的关系. 气象学报, 74(3):352-366

Wu Ping, Ding Yihui, Liu Yanju, Li Xiucang. 2016. Influence of the East Asian winter monsoon and atmospheric humidity on the wintertime haze frequency over central-eastern China. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(3): 352-366

Abstract Based on long-term observations collected at 423 stations in China and the NCEP/NCAR reanalysis data for the period from 1961 to 2013, the influence of the East Asian winter monsoon (EAWM) and atmospheric humidity on the wintertime haze frequency over North China, Jianghuai Region and South China has been discussed. Results suggest that: (1) there is a remarkable negative correlation between the EAWM and the wintertime haze frequency. First, a weakening EAWM leads to decreases in surface wind speed, and subsequent increases in the wintertime haze frequency over all the three regions. Decreases in the number of days with daily maximum wind speed of 7–8 m/s in North China and daily maximum wind speed of 6–8 m/s in Jianghuai Region and increases in the number of days with daily maximum wind speed not greater than 2 m/s in South China have the largest impact on the wintertime haze frequency. Second, as the intensity of the EAWM weakens, the surface temperature increases, which induces increases in the wintertime haze frequency, especially in North China; (2) the relative humidity decreases in response to increases in temperature. There is a remarkable negative correlation between the relative humidity and the wintertime haze frequency in Jianghuai Region and South China; (3) the increasing wintertime temperature is conducive to the strengthening of the atmospheric stability. The wintertime haze frequency is negatively correlated with the atmospheric stability over all the three study regions, particularly with the saturation mixing ratio from 850 to 500 hPa; (4) the wintertime haze frequency in North China is significantly positively correlated with the wintertime water vapor net income. In Jianghuai Region, it is significantly positively correlated with the net income of wintertime zonal water vapor transport but significantly negatively correlated with the net income of wintertime meridional water vapor transport. In South China, it has a significantly negative correlation with the net income of wintertime meridional water vapor transport, but has no significant correlation with the net income of wintertime zonal water vapor transport.

Key words Haze, East Asian winter monsoon (EAWM), Atmospheric humidity, Water vapor budget

^{*} 资助课题: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2012CB417205、2013CB430202)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406001、20140618)、国家自然科学基金资助项目(41130960、41401056)、江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX15_0858)。

作者简介: 吴萍, 主要从事气候变化研究。E-mail: nj_wp@126.com

通讯作者: 柳艳菊, 主要从事气候变化与季风研究。E-mail: liuyanji@cma.gov.cn

摘 要 利用 1961—2013 年中国地面台站长期观测资料和同期 NCEP/NCAR 再分析资料,以华北、江淮和华南为研究区,分析了中国中东部冬季霾日的形成与东亚冬季风以及大气湿度的关系。结果表明:(1)冬季霾日与东亚冬季风强度成显著的负相关。首先,东亚冬季风强度的减弱使得地面风速减小,进而导致冬季霾日增多。其中,华北 7—8 m/s 最大风速日数和江淮 6—8 m/s 最大风速日数的减少,及华南 ≤ 2 m/s 最大风速日数的增多对各区冬季霾日的增多作用较大。其次,东亚冬季风减弱引起冬季气温的持续升高,易导致冬季霾日的增多,这在华北地区较之在江淮和华南更为明显。(2)由于气候变暖,冬季气温升高,使得近地面相对湿度减小。在江淮和华南地区,冬季霾日的增多与近地面相对湿度的减小显著相关,而在华北地区这种相关较弱。(3)冬季气温升高也有利于大气层结稳定度的增强,3 个区域冬季霾日的增多均与大气层结稳定度的增强显著相关,特别是与对流层中低层(850—500 hPa)大气饱和度的降低显著相关。(4)冬季霾日数变化与区域水汽输送关系密切。其中,华北地区的冬季霾日数与水汽总收入成显著正相关,江淮地区与纬向水汽收入成显著正相关,与经向水汽收入成显著负相关,华南地区与经向水汽收入成显著负相关。

关键词 霾,东亚冬季风,大气湿度,水汽收入

中图法分类号 P461

1 引 言

霾是指大量极细微的尘粒等均匀地浮游在空中,使空气出现普遍混浊、水平能见度小于 10 km 的现象(中国气象局,2007)。近年来,随着中国经济的快速发展、城市化进程的加快以及能源和交通规模的加大,大气污染日益严重,并由单一型向复合型大气污染转变,尤其以京津冀、长三角和珠三角为代表区域的复合型污染日益凸显,造成霾天气频繁发生(王跃等,2014)。20 世纪 50 年代至 21 世纪初,中国年平均霾日数成增多趋势,特别是 20 世纪 80 年代以来霾日增多趋势明显(高歌,2008;胡亚旦,2009;吴兑等,2010;符传博等,2014),而雾日数有显著的下降趋势(王丽萍等,2005;丁一汇等,2014)。季节变化上,冬季霾日数最多,秋季和春季次之,夏季最少(宋连春等,2013;符传博等,2014)。此外,随着霾天气的增多,近几十年大部分地区尤其是大中城市的能见度也呈现出下降趋势(吴兑等,2006;张利等,2011)。

霾天气增多除与大气污染物排放的增多密切相关外,气象/气候条件变化也是重要的原因。大气对污染物的稀释扩散能力由于气象条件的不同会出现较大的差异(吴兑,2011)。对于霾天气增多的气象/气候条件的研究大多基于霾日数变化与气象要素(风、降水、日照时数等)的统计关系(高歌,2008;吴兑等,2010;胡亚旦,2009;宋连春等,2013;王珊等,2014)。近些年来,影响中国天气、气候的东亚冬季风系统(尹志聪等,2015)、ENSO 事件(Gao, et al, 2015)以及北极海冰的变化(Wang, et al, 2015)对中

国霾天气增多的影响逐渐得到关注。有研究(胡亚旦,2009;Gao, et al, 2015;张蓬勃等,2015)证实东亚冬季风的年代际减弱是霾日增多的一个原因,中国区域空气质量的持续恶化与东亚季风活动的年代际减弱所引起的环流场变异密切相关(Zhu, et al, 2012)。例如,2013 年 1 月中国东部地区发生了大范围、持续性的强雾-霾天气,研究发现平流层突然升温、东亚冬季风减弱、东亚大槽减弱、西伯利亚高压减弱、经向环流减弱、地面风异常减弱是发生和维持这次雾-霾天气的主要原因,而不是排放的突然增多所致(Wang, et al, 2014;张人禾等,2014)。尹志聪等(2015)研究了华北黄淮地区冬季霾年代际增多与东亚冬季风年代际减弱的关系,指出东亚冬季风减弱使得环流形势在水平方向和垂直方向上都不利于污染物的扩散,进而有利于霾的发生。此外,形成霾的气溶胶粒子是吸湿性增长的(吴兑,2006),因而湿度是影响霾形成的重要因子之一。气候变暖所产生的大气湿度的变化可能也与霾日的快速增多密切相关。Song 等(2012)研究发现,气候变暖背景下,中国大部分地区的相对湿度成下降趋势。丁一汇等(2014)讨论了大气湿度在雾-霾转变中的作用,表明霾日的相对湿度约为 69%,比以前的阈值要低,意味着霾粒子更不易向雾滴转变,这可能是导致霾日增多、雾日减少的主要环境因子之一。目前关于不同大气湿度参数在中国不同区域对雾-霾的影响以及在雾-霾转换中所起的作用研究尚少,这也是值得进一步探讨的问题。

从已有研究来看,有关东亚冬季风变化对中国区域霾长期变化的影响研究尚不够全面,关于大气

湿度与霾长期气候变化的关系研究还不够深入。此外,由于中国地跨热带、亚热带、温带等多种气候带,各地的气候特征及气候变化具有明显的区域差异,不同区域霾的形成及变化原因可能也不尽相同,而有关东亚冬季风和大气湿度对不同区域霾天气形成的影响以及区域间差异进行比较研究尚不多见。基于此,选择中国霾多发的华北、江淮和华南地区作为3个研究区,对冬季风变化下影响各区冬季霾日的主要气象参数变化进行全面分析和比较研究,包括冬季地面风速、气温和降水,尤其强调气候变化下大气湿度(包括相对湿度、中低层大气饱和度和水汽条件)作用的改变,这对全面、深入了解中国冬季霾日的发生及变化原因有较好的科学支撑,也在一定程度上对中国霾天气多发的各个区域霾天气预报预警业务工作有所裨益。

2 资料和研究区

2.1 资料

所用观测资料来自中国气象局国家气象信息中

心,包括1961—2013年霾、雾、能见度等逐日数据以及气温、降水、相对湿度、风速等逐月数据。原始数据均经过初步的质量控制。在进行数据分析前,首先使用霾观测资料对站点进行筛选,选取1961—2013年冬季连续无缺测的站点,最后共挑选749个地面气象站,其中,中东部地区为423站,站点分布见图1。利用能见度和相对湿度对霾(雾)观测资料进行处理,将有霾(雾)天气现象记录且将日最小能见度小于10 km,日平均相对湿度小于(大于)90%,定义为1个霾日(雾日)。此外,能见度资料在1980年以前以等级的方式记录,自1980年起以视程(千米)记录,其对照关系见表1。由于前后记录方式的不一致,文中对能见度资料进行了一致性处理,将1980年以来以千米记录的能见度资料均转换为能见度等级(丁一汇等,2014)。研究时段为1961—2013年冬季,冬季定义为当年12月至次年2月(如1961年冬季指1961年12月—1962年2月)。文中平均值均指1981—2010的气候平均值。

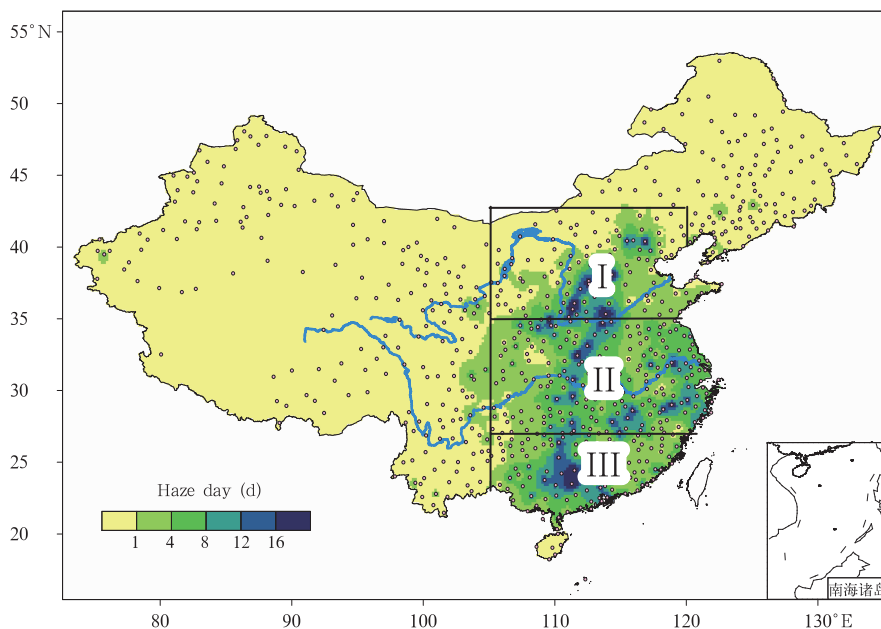


图1 1961—2013年中国冬季霾日及站点的空间分布和分区

Fig. 1 Spatial distribution of the wintertime haze days and the stations during the period 1961–2013 and the three regions of China defined in this study

本研究也使用了美国国家环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)提供的

逐月风场、高度场、海平面气压场、地表气压、气温、露点温度、比湿等再分析资料,水平分辨率为 2.5°

×2.5°,垂直17层。水汽收支的计算方法参考王宝鉴等(2006)。

表1 能见度等级与水平距离对照表
Table 1 Table of visibility level and corresponding horizontal distance

能见度等级	能见度距离 L (km)
0	$L < 0.05$
1	$0.05 \leq L < 0.2$
2	$0.2 \leq L < 0.5$
3	$0.5 \leq L < 1.0$
4	$1.0 \leq L < 2.0$
5	$2.0 \leq L < 4.0$
6	$4.0 \leq L < 10.0$
7	$10.0 \leq L < 20.0$
8	$20.0 \leq L < 50.0$
9	$50.0 \leq L$

2.2 研究区

中国冬季霾日主要分布在105°E以东、42°N以南的中东部季风区(图1),东北和西部地区冬季霾发生的频率相对较低。为了分析冬季霾形成条件的区域特征,根据气候条件将中国中东部季风区分为

3个子区:Ⅰ区(35°—42°N,105°—120°E)、Ⅱ区(27°—35°N,105°—120°E)和Ⅲ区(22.5°—27°N,105°—120°E)分别表示华北、江淮和华南地区,不包括东北地区。

3 冬季霾和能见度的长期变化特征及区域差异

3.1 冬季霾日的长期变化特征

从冬季霾日的时间变化曲线(图2)可以看出,最近30年(1981—2010年),华北的冬季平均霾日为3.8 d,江淮和华南冬季平均霾日相对较多(均为6.4 d)。近53年华北、江淮、华南3个区域冬季霾日总体都呈现出不同程度的增多趋势。这种增多趋势主要表现为两个快速上升期:第一个快速上升期为20世纪60—70年代,其次为21世纪初至今,而后者上升速率明显加快。在20世纪60年代,3个区冬季霾日均较少,平均为2 d左右,而近10年华北则平均上升至8—9 d,增多为4—5倍,江淮和华南上升至13—14 d,增多为6—7倍。

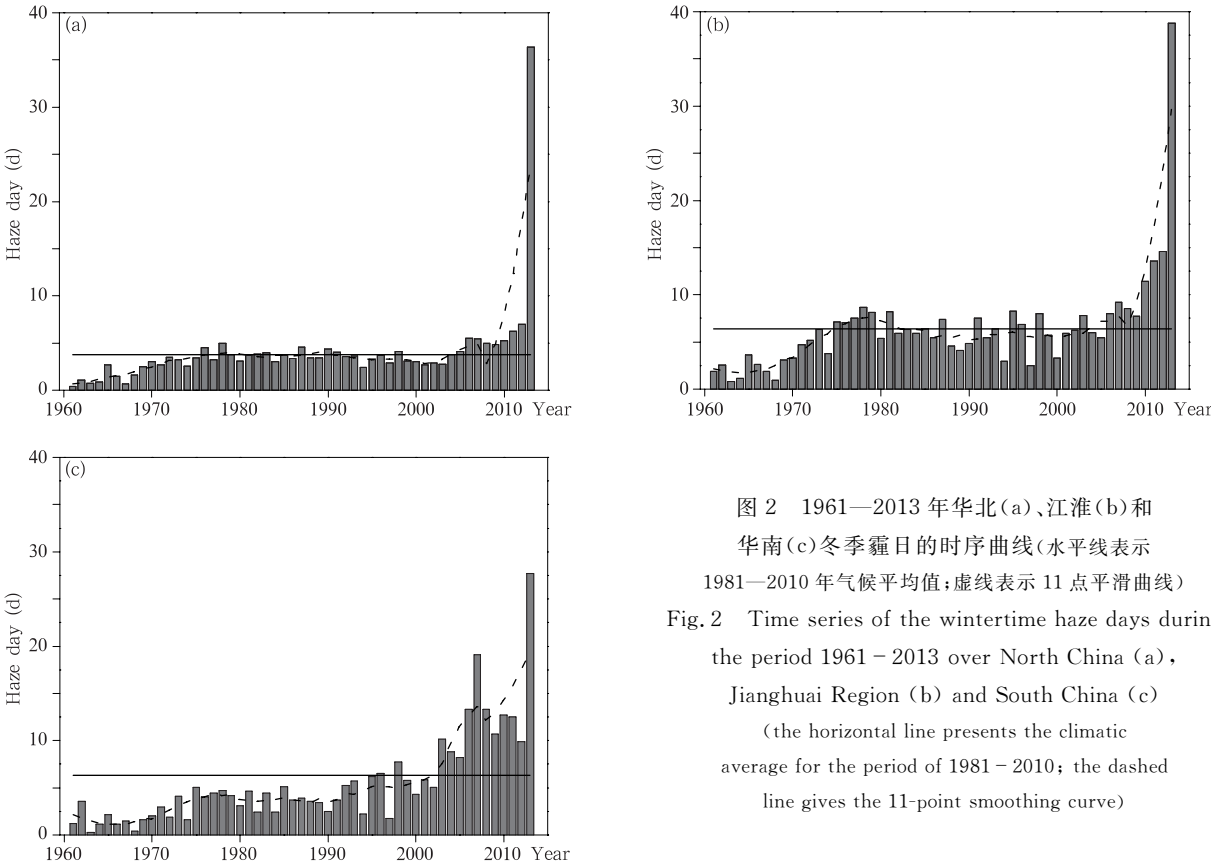


图2 1961—2013年华北(a)、江淮(b)和
华南(c)冬季霾日的时序曲线(水平线表示
1981—2010年气候平均值;虚线表示11点平滑曲线)
Fig.2 Time series of the wintertime haze days during
the period 1961–2013 over North China (a),
Jianghuai Region (b) and South China (c)
(the horizontal line presents the climatic
average for the period of 1981–2010; the dashed
line gives the 11-point smoothing curve)

华北、江淮和华南地区冬季霾日数的长期变化特征也存在一些差异。华北地区冬季霾日在 20 世纪 60—70 年代明显上升, 至 1978 年达到高峰 (5 d), 80—90 年代霾日的变化较为平稳, 基本维持年均 3.5 d, 而从 2003 年开始, 霾日又快速上升; 江淮地区冬季霾日也是在 20 世纪 60—70 年代快速上升, 1978 年达到高峰 (8.6 d), 80—90 年代霾日略有下降, 自 2001 年起, 霾日又快速上升; 而华南地区冬季霾日从 20 世纪 60 年代起一直成不断上升的趋势, 2007 年霾日增至 19 d, 2008—2012 年冬季霾日有所减少, 但 2013 年冬季霾日剧增, 为近 53 年最多 (27.7 d)。值得注意的是华北、江淮和华南地区在 2013 年的冬季霾日均异常偏多, 除了污染物排放条件外, 可能主要是由于多种不利的大气环流条件 (如冬季风弱、地面风速小、近低层湿度大、层结稳定以及降水少等) 的复合加强作用造成的, 此外, 2013 年起地面气象站开始使用能见度仪自动观测能见度, 取代之前的人工目测能见度, 使得霾现象记录的主观性减小, 这可能也是霾日增多的原因之一, 对此尚

需进一步研究, 尤其是对能见度资料的偏差和均一化订正问题的研究。

3.2 冬季能见度的长期变化特征

雾、霾、降水和沙尘暴等天气现象是影响能见度的主要因子, 而近年来霾天气现象频发, 已成为影响能见度的最重要的天气现象之一。Wu 等 (2012) 的研究表明, 大部分地区地面水平能见度近 50 年均有所不同程度的下降, 且以大城市最为明显。由图 3 可以看出, 近 53 年华北、江淮和华南冬季霾日的能见度均成下降趋势, 华北下降趋势更为明显。分析发现 3 个区冬季霾日与霾日能见度均成明显的负相关, 相关系数分别为 -0.50 、 -0.42 和 -0.33 , 均通过了 0.05 水平的显著性检验, 即近 53 年不仅冬季霾日数增多, 霾发生的强度也有所增强。由冬季平均能见度的变化可以看出, 3 个区的平均能见度总体也成下降趋势, 江淮和华南下降的尤为明显。3 个区冬季霾日发生的能见度均较冬季平均能见度低, 尤其是华北地区, 霾日平均能见度 (6.4 级) 较冬季平均能见度 (7.3 级) 约降低了 1 级。华北、江淮

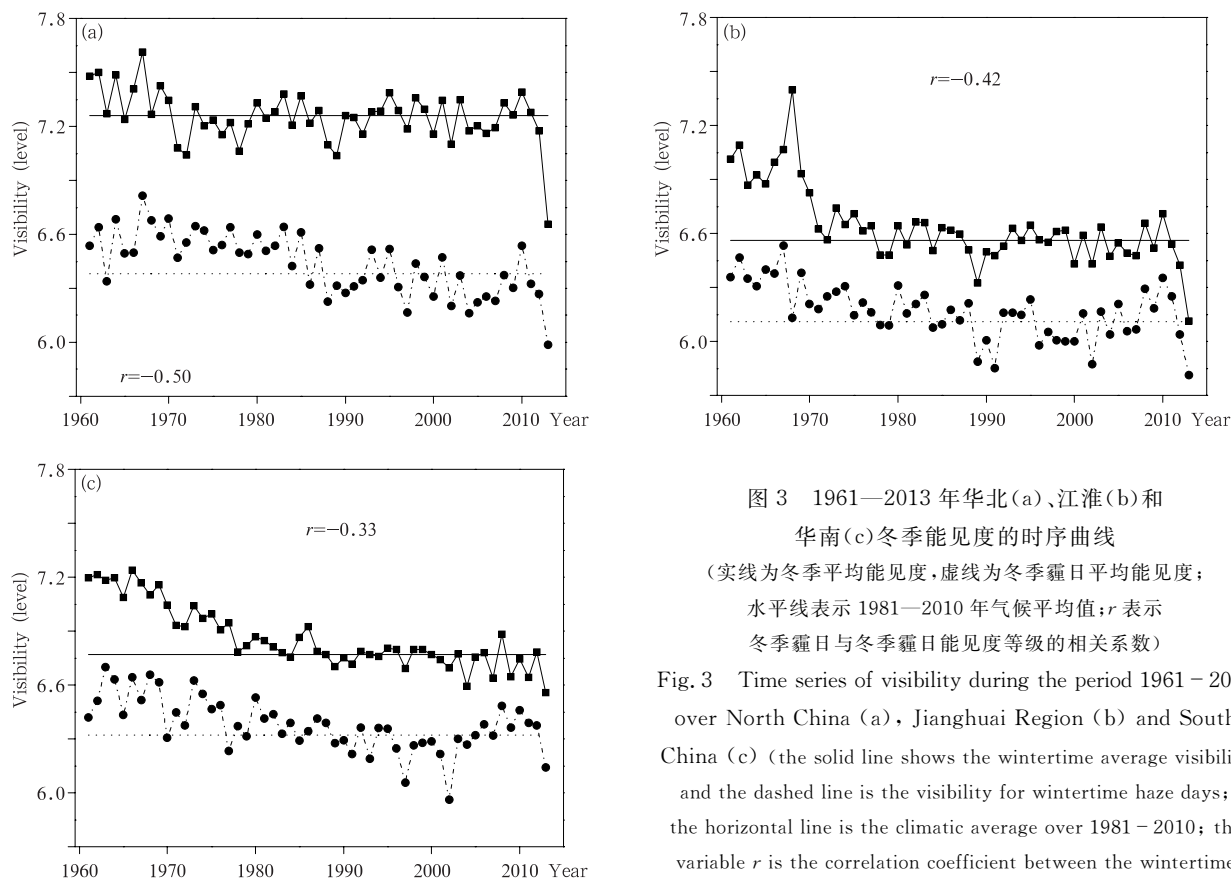


图 3 1961—2013 年华北 (a)、江淮 (b) 和 华南 (c) 冬季能见度的时序曲线

(实线为冬季平均能见度, 虚线为冬季霾日平均能见度; 水平线表示 1981—2010 年气候平均值; r 表示冬季霾日与冬季霾日能见度等级的相关系数)

Fig. 3 Time series of visibility during the period 1961–2013 over North China (a), Jianghuai Region (b) and South China (c) (the solid line shows the wintertime average visibility and the dashed line is the visibility for wintertime haze days; the horizontal line is the climatic average over 1981–2010; the variable r is the correlation coefficient between the wintertime haze days and the wintertime haze day visibility level)

和华南冬季霾日能见度与冬季平均能见度有相似的年际及年代际变化,其相关系数分别为 0.64、0.72 和 0.72,均通过了 0.001 水平的显著性 t 检验,这表明冬季平均能见度的变化受霾日能见度变化的影响。由此可见,霾是使能见度恶化的一个非常重要的因子,随着冬季霾日的增多,霾的强度也增强,霾日能见度降低,冬季平均能见度亦降低。

4 冬季霾的形成与东亚冬季风的关系

东亚冬季风是北半球冬季最为活跃的环流系统之一,对中国的天气和气候有重要影响。强东亚冬季风常带来较强的冷空气和偏北大风,有利于污染物的稀释和扩散,反之亦然。东亚冬季风对霾形成的调控作用,往往还通过与其相关的地面风、近地面气温以及降水等气象条件表现出来。关于降水与霾的关系,已有很多研究(胡亚旦,2009;宋连春等,2013),结果均表明降水日数减少、无降水日数增多对霾日数的增多有显著影响,本研究的结论与之相同,不再赘述。下面重点分析东亚冬季风及冬季地面风速、气温对中国中东部地区冬季霾形成的影响。

4.1 东亚冬季风与霾的关系

东亚冬季风的强弱通常用西伯利亚高压的强度、东亚大槽强度以及北风强度等来表征。晏红明等(2003)从表征东亚冬季风强度的 500 hPa 东亚大槽入手,用冬季的 500 hPa 高度场 (25° — 40° N, 110° — 130° E) 区域平均来代表东亚冬季风的强度,文中将该区域平均的 500 hPa 高度场标准化处理并将其结果乘以 -1 ,以此定义为东亚冬季风指数。冬季风指数越大表示东亚大槽越强,冬季风越强,反之亦然。图 4 为东亚冬季风指数的时间序列,可见近 53 年东亚冬季风的强度总体成下降趋势。在 20 世纪 80 年代中期东亚冬季风发生了一次年代际转变,80 年代中期之前,冬季风指数大多为正值,表明东亚冬季风偏强;而 80 年代中期之后,冬季风指数大多为负值,表明东亚冬季风偏弱。大多数研究(贺圣平等,2012;梁苏洁等,2014)也表明,东亚冬季风从 20 世纪 80 年代中期以来呈现出明显的年代际减弱特征。通过计算东亚冬季风指数的时间序列与华北、江淮和华南地区冬季霾日数时间序列的相关系数,发现其均成显著的负相关,相关系数分别为

-0.42 、 -0.25 和 -0.31 ,均通过了 0.05 水平的显著性 t 检验,即东亚冬季风偏弱,偏北气流偏弱,气流的输送和扩散能力下降,这将有有利于霾天气的发生。

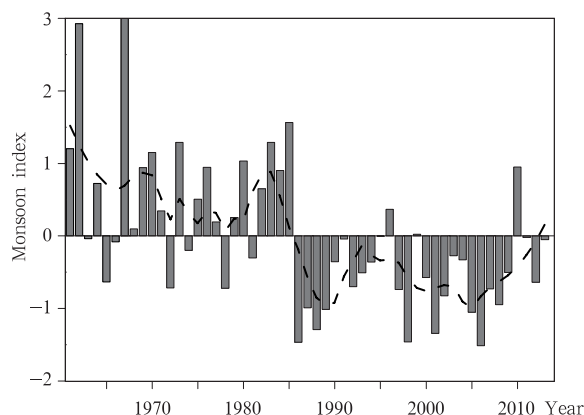


图 4 1961—2013 东亚冬季风指数的时序曲线
(虚线表示 11 点平滑曲线)

Fig. 4 Time series of the East Asian winter monsoon index during the period 1961–2013
(dashed line is the 11-point smoothing curve)

从年代际趋势上看,20 世纪 80 年代之前东亚冬季风偏强,华北、江淮和华南地区冬季霾日数虽然都在增多,但还是处于霾偏少时期,80 年代之后东亚冬季风在经历了 5 年的强盛期后减弱至今,而华北和江淮地区冬季霾日在 80—90 年代处于较平稳的年际波动状态,华南地区冬季霾日缓慢的上升,但霾日数仍处于偏少时期,而从 21 世纪初起,华北、江淮和华南地区冬季霾日均表现出明显的上升状态,霾明显偏多偏强。华北、江淮和华南地区冬季霾日的年代际变化与东亚冬季风的年代际变化并不完全一致,这可能与改革开放前后霾粒子的来源以及数量有关。康杜娟等(2005)发现 1956—1970 年沙尘活动频繁,1985—1999 年沙尘活动稀少,这是因为东亚季风强度影响沙尘天气发生的频率,东亚季风强(弱),沙尘活动频繁(稀少)。改革开放前,经济发展相对缓慢,霾主要由灰尘、浮尘粒子等组成,由于东亚冬季风偏强,偏北风较强,易产生沙尘天气,空气中的浮尘粒子增加,则易形成霾天气;此外,风又将浮尘粒子进行输送、稀释,减少霾天气的形成(胡亚旦,2009),因此,在风的正负作用下,这个时期的霾日虽呈增多的趋势,但仍相对偏少。改革开放初

期,中国经济发展开始加快,排放到大气中的硝酸盐、硫酸盐和有机碳氢化物等气溶胶粒子开始增多,霾粒子的来源变得复杂多样,但大气中的这类气溶胶粒子总量还是相对较少,而东亚冬季风也开始进入减弱期,灰尘天气相对减少,由于霾粒子相对较少,即使东亚冬季风偏弱,也不易形成霾天气。而21世纪初以来,随着中国经济的深入发展,能源消耗的加剧,排放到大气中的气溶胶粒子大量增多,而东亚冬季风仍偏弱,这将导致偏北气流的输送和水平扩散能力变弱,大气中的颗粒物容易积聚,有利于霾天气的形成。

为了进一步说明东亚冬季风对中国中东部地区霾日的影响,图5给出了各个站点冬季霾日与东亚冬季风指数的相关系数。可以看出,冬季风指数与中国中东部地区的大部分地区冬季霾日均成负相关,尤其是京津地区、长江三角洲、珠江三角洲等霾高值区负相关显著。这表明冬季风弱时,空气的流动性差,中国中东部大部分地区尤其是霾严重区域的污染物易堆积,形成霾天气;反之亦然。

4.2 不同冬季风条件下地面风与霾的关系

东亚冬季风的强弱直接影响局地地面风速的大小,地面风力条件是污染物颗粒稀释扩散的主要动力。由近53年地面风速距平的时序曲线(图6)可以看出,华北、江淮和华南地区地面风速距平的变化与冬季霾日的变化存在相反的趋势。华北、江淮和华南地区20世纪80年代中期之前东亚冬季风较强,地面风速均偏大,但成减小的趋势,而这期间3个区的冬季霾日均偏少,但成增多的趋势;20世纪80年代中期之后东亚冬季风较弱,3个区地面风速均偏小,但3个区霾粒子经历了由20世纪80—90年代较少到21世纪以来大量增多的变化,由霾粒子数量和相对偏小的地面风速的共同作用,霾日数在经历了20世纪80—90年代稳定波动(华北和江淮)或缓慢上升(华南)之后,在21世纪进入了快速上升期。但也注意到华南自2008—2012年地面风速有增大的趋势,这可能是其2008—2012年冬季霾日减少的原因之一。由地面风速距平时间序列与冬季霾日距平时间序列的相关系数也可以看出它们均成非常强的负相关,相关性均通过0.001水平的显著性 t 检验。

为了考察不同风力条件对霾日增减趋势的影响,计算了冬季霾日数与不同风力等级日数的相关系数(表2)。文中定义日最大风速 ≤ 6 m/s为弱风,日最大风速 > 6 m/s为强风。可以看出,华北、江淮和华南地区冬季霾日数与弱风日数均成正相关,而与强风日数基本均成负相关。同时,不同风力条件对霾天气的增减趋势影响亦不同,其中,对华北地区冬季霾日增减趋势影响最显著的是日最大风速为7—8 m/s的日数增减;对江淮地区冬季霾日增减趋势影响最显著的是日最大风速为6—8 m/s的日数增减;对华南地区冬季霾日增减趋势影响最显著的是日最大风速 ≤ 2 m/s的日数增减。而由不同风力等级日数的变化趋势可以看出,对3个区冬季霾日数有增多趋势影响的弱风日数在增多,而对霾日有减少趋势影响的强风日数在减少。静稳天气的增多,强风天气的减少,使得污染物不易扩散而在低层积聚,从而更易造成霾的形成或增强。

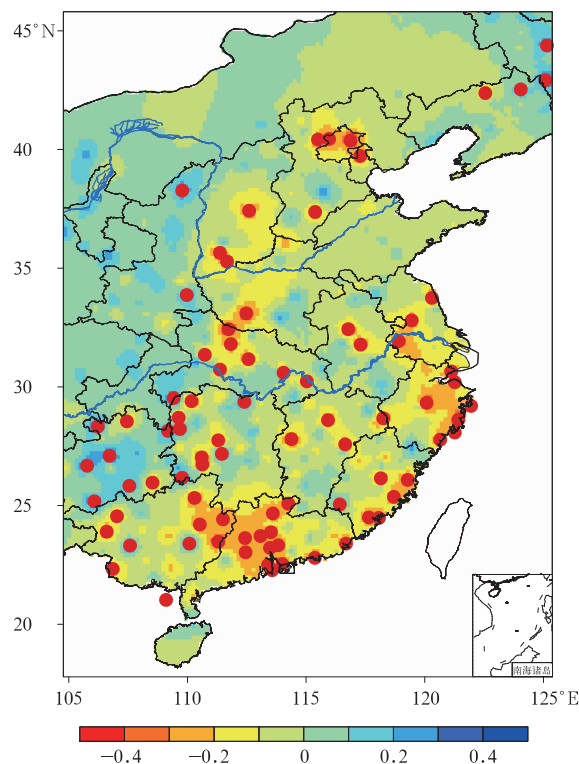


图5 1961—2013年中国中东部冬季霾与冬季风指数的相关关系(红点表示通过0.05水平显著性检验的站点)

Fig. 5 Correlation coefficients between the wintertime haze days and East Asian winter monsoon index during the period 1961–2013 in central and eastern China (red dots denote the values passing the 95% confidence level)

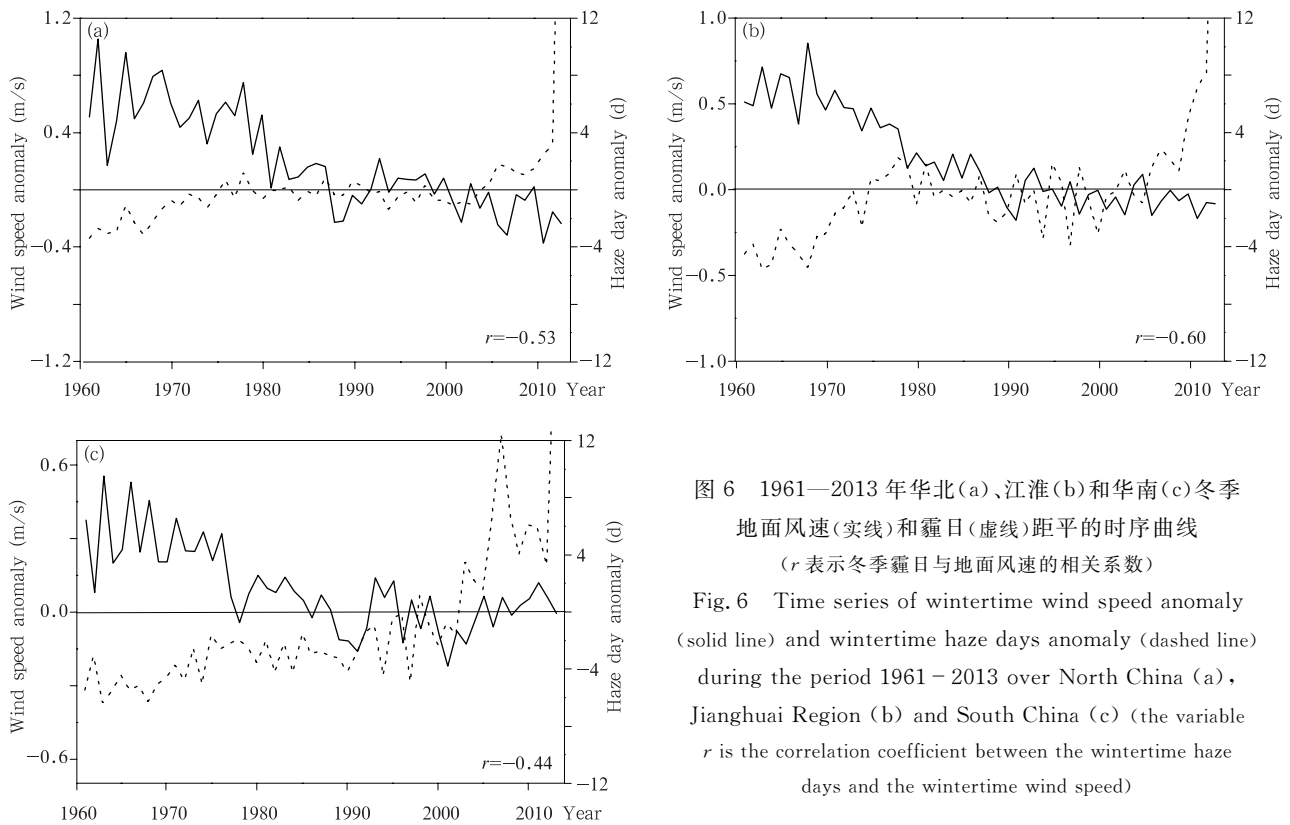


图6 1961—2013年华北(a)、江淮(b)和华南(c)冬季地面风速(实线)和霾日(虚线)距平的时序曲线(r 表示冬季霾日与地面风速的相关系数)
Fig. 6 Time series of wintertime wind speed anomaly (solid line) and wintertime haze days anomaly (dashed line) during the period 1961–2013 over North China (a), Jianghuai Region (b) and South China (c) (the variable r is the correlation coefficient between the wintertime haze days and the wintertime wind speed)

表2 华北、江淮和华南冬季霾日与不同风力等级日数的相关关系
Table 2 The correlation coefficient between the wintertime haze days and different levels of daily wind speed over North China, Jianghuai Region and South China

最大风速($v_{\max}$)等级		华北	江淮	华南
弱风($v_{\max} \leq 6$ m/s)	$v_{\max} \leq 2$ m/s	0.08	0.34**	0.67**
	$2 \text{ m/s} < v_{\max} \leq 3 \text{ m/s}$	0.32**	0.32**	0.62**
	$3 \text{ m/s} < v_{\max} \leq 4 \text{ m/s}$	0.32**	0.28*	0.61**
	$4 \text{ m/s} < v_{\max} \leq 5 \text{ m/s}$	0.29*	0.19	0.61**
	$5 \text{ m/s} < v_{\max} \leq 6 \text{ m/s}$	0.06	-0.10	0.52**
强风($v_{\max} > 6$ m/s)	$6 \text{ m/s} < v_{\max} \leq 7 \text{ m/s}$	-0.09	-0.35**	0.10
	$7 \text{ m/s} < v_{\max} \leq 8 \text{ m/s}$	-0.40**	-0.35**	-0.1
	$8 \text{ m/s} < v_{\max} \leq 9 \text{ m/s}$	-0.32**	-0.32**	-0.14
	$9 \text{ m/s} < v_{\max} \leq 10 \text{ m/s}$	-0.34**	-0.31*	-0.34**
	$v_{\max} > 10 \text{ m/s}$	-0.25*	-0.25*	-0.64**

注: * 表示相关系数通过 0.05 水平的显著性检验; ** 表示相关系数通过 0.01 水平的显著性检验; 黑体表示该等级风速日数呈上升趋势; 下划线表示该等级风速日数呈下降趋势。

4.3 不同冬季风条件下近地面气温与霾的关系

东亚冬季风强度和南扩程度的变化直接影响中国冬季气温的变化。由华北、江淮和华南地区冬季气温距平的时间变化序列(图 7)可以看出,与东亚冬季风的年代际变化一致,近 53 年 3 个区冬季气温在 20 世纪 80 年代中期也发生了一次年代际变化,80 年代中期之前东亚冬季风偏强,3 个区气温均偏低,80 年代中期之后东亚冬季风偏弱,3 个区冬季气

温均偏高,3 个区的冬季霾日也由少向多转变。计算冬季气温的时间序列与冬季霾日时间序列的相关系数,发现华北、江淮和华南地区冬季气温与霾日数均成正相关关系,但是只有华北地区的正相关性通过了 0.05 水平的显著性检验,江淮和华南地区均未通过 0.05 水平的显著性检验。这表明冬季风通过近地面气温对华北地区冬季霾日的影响最为明显。其原因可能是中国各地冬季气温的年际及年代际变

化不仅与冬季风本身的强度有关,还与冬季风向南扩展程度有关(郭其蕴,1994)。冬季风强度的变化对华北地区的冬季气温影响最为直接,而中国南方地区的冬季气温对冬季风的响应较华北地区有所减弱。东亚冬季风减弱,3个区冬季气温上升,冬季霾

日均增加,这可能是由于地面气温上升,饱和比湿增大,如果实际水汽不增加或增加不明显,则相对湿度降低,而相对湿度的降低将减弱雾-霾的转换,霾不易向雾转换,从而导致霾日增多(丁一汇等,2014),这将在下一节具体分析。

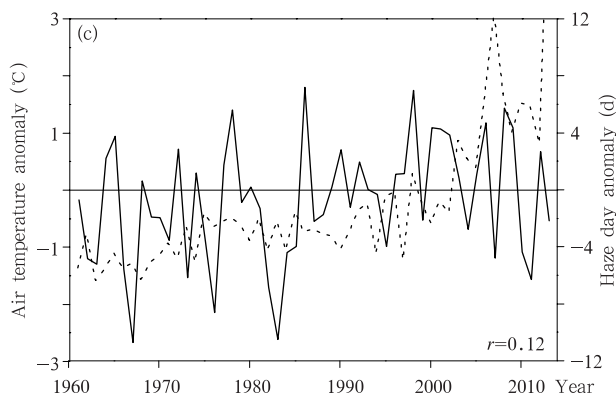
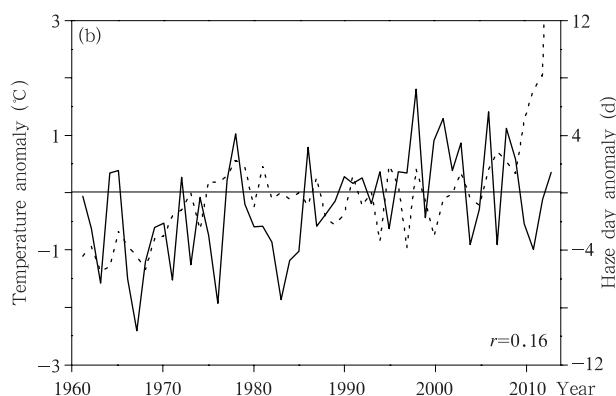
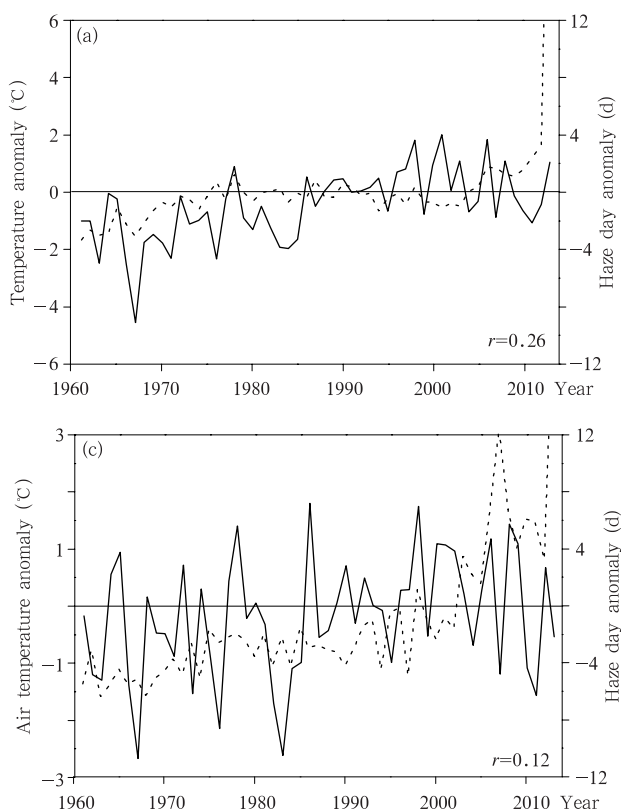


图7 1961—2013年华北(a)、江淮(b)和
华南(c)冬季地面气温(实线)和霾日(虚线)

距平的时序曲线(r 表示冬季霾日与地面气温的相关系数)

Fig. 7 Time series of wintertime air temperature anomaly (solid line) and wintertime haze days anomaly (dashed line) during the period 1961–2013 over North China (a), Jianghuai Region (b) and South China (c) (the variable r is the correlation coefficient between wintertime haze days and wintertime temperature)

5 冬季霾的形成与大气湿度的关系

湿度是影响霾的重要因子之一。在全球变暖背景下,东亚冬季风减弱,中国冬季气温偏高,中国东部大部分地区相对湿度成下降的趋势(Song等,2012)。丁一汇等(2014)分析发现气温升高导致的中国近地面相对湿度的下降对雾和霾形成的环境条件产生影响。下面将从长期气候变化角度分析华北、江淮和华南地区冬季不同大气湿度参数(相对湿度、大气饱和度、水汽条件等)的变化对各区域冬季霾形成的影响。

5.1 相对湿度与霾的关系

图8为中国中东部冬季霾日数与冬季平均相对湿度相关系数的空间分布,可见两者在 35°N 以南大部分地区成负相关,并且,长江以南大范围地区负

相关性显著,通过了0.05水平的显著性 t 检验;而两者在 35°N 以北大部分地区的相关并不明显。Song等(2012)研究发现,中国东部大部分地区的冬季相对湿度下降,表明江淮和华南冬季相对湿度的下降可能是导致冬季霾日增多的原因之一。

近地面相对湿度是区分雾和霾的一种非常关键的气象要素。雾和霾都是由吸湿性增长的气溶胶粒子组成,但雾是在空气中的水汽达到(或接近)饱和时形成,而霾是在相对湿度小于80%的情况下形成,相对湿度在80%—95%是雾-霾混合物,但主要成分应该还是霾(吴兑,2006)。雾-霾粒子是可以相互转换的,当大气湿度增加到接近饱和($\geq 95\%$)时,霾粒子可以吸湿转化成雾滴,当大气湿度下降至小于80%时,雾滴脱水后也可转化为霾粒子。因此,相对湿度的变化对雾和霾日数的变化有重要影响。

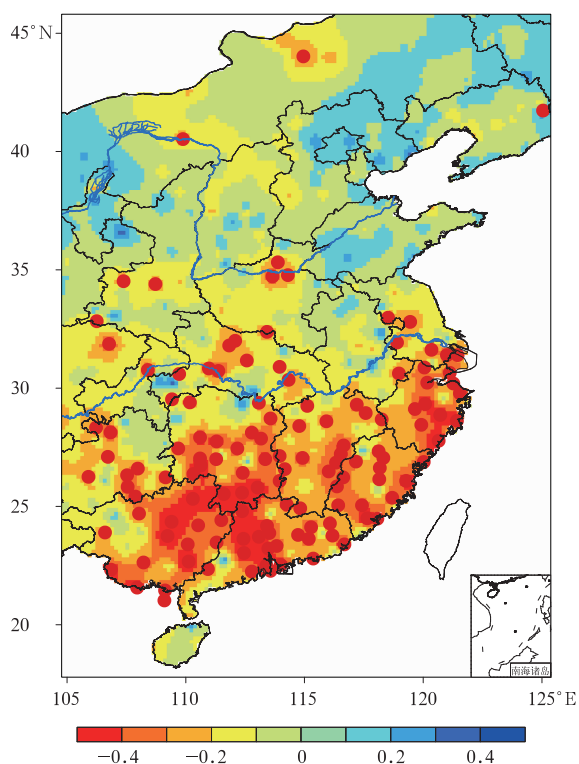


图8 1961—2013年中国中东部冬季霾日与冬季平均
相对湿度的相关系数的空间分布

(红色实心点表示通过0.05显著性检验的站点)

Fig. 8 Correlation coefficient between wintertime haze days and wintertime average relative humidity during the period 1961–2013 in central-eastern China (red dots denote the values passing the 95% confidence level)

由华北、江淮和华南地区1961—2013年冬季雾日的时间变化(图略)可以看出,华北地区冬季雾日变化趋势不明显;江淮地区冬季雾日在20世纪90年代之前是波动上升的,这与霾日的变化大致相似(图2),90年代之后雾日不断下降,这与霾日的上升趋势是相反的;华南地区冬季雾日从20世纪60年代缓慢上升,至1978年前后达到峰值,之后一直下降,这与华南冬季霾日一直上升的趋势也是相反的。3个区冬季霾日与雾日变化趋势的不一致,尤其是近些年霾日快速增多,而雾日减少,这与相对湿度的变化有着怎样的关系,下面将探讨这个问题。

由近53年冬季霾日近地面相对湿度的时间变化曲线(图9)可以看出,华北霾日的相对湿度平均为59%,江淮为71%,华南为72%,均在80%的阈值范围内。华北地区霾日的相对湿度总体而言是一直处于上升的趋势,在20世纪60年代,霾日平均相

对湿度约为55%,2000年后约上升至61%。江淮地区霾日的相对湿度在20世纪90年代之前成逐渐上升的趋势,至1989年前后达到峰值(平均为77%),之后霾日的相对湿度不断下降,至今约降至66%。华南地区霾日相对湿度从20世纪60年代以后波动上升,至2002年前后霾日的相对湿度达到76%,之后开始下降,至今下降至67%。由霾日相对湿度和冬季平均相对湿度的时序曲线比较可以看出,3个区霾日相对湿度与冬季平均相对湿度有着相似的年际变化,平均相对湿度的变化影响霾日相对湿度的变化。

相对湿度是实际比湿与饱和比湿之比,根据克劳修斯-克拉贝龙方程,近地面温度升高,则地表的饱和比湿增大,如果实际比湿不升高,则相对湿度下降,反之亦然。由于气候变暖,华北、江淮和华南地区的冬季气温均成明显上升的趋势(图7),华北地区更甚,因而华北、江淮和华南冬季近地面的饱和比湿不断升高。近53年华北、江淮和华南地区冬季实际比湿整体也成上升趋势(图略)。从长期趋势看,华北地区实际比湿与气温的上升率相当,平均相对湿度整体变化趋势不明显,但是江淮和华南地区由于实际比湿的上升率小于气温的上升率,导致近地面平均相对湿度下降(大气变干)。平均相对湿度的降低导致霾日的相对湿度也偏低。霾日的相对湿度偏低,如果没有更多的水汽输送使空气达到或接近饱和,霾滴很难向雾滴转换(丁一汇等,2014)。因此,由于气候变暖,近地面气温的升高造成平均相对湿度的降低使得雾-霾的相互转换有所减弱,这可能是江淮和华南雾日减少,而霾日增多的一个原因。由霾日数与平均相对湿度的相关系数可以看出,3个地区的霾日与近地面平均相对湿度均成负相关,其中,江淮和华南的负相关性均通过了0.05水平的显著性 t 检验,而华北的这种负相关性并不显著。由雾日数与平均相对湿度的相关系数可以看出,3个地区的雾日与近地面平均相对湿度均呈显著的正相关关系,均通过了0.001水平的显著性检验。可见,江淮和华南地区冬季平均相对湿度的变化对冬季霾日与雾日有着显著的影响,而华北地区冬季平均相对湿度的变化对冬季的雾日影响显著,而对霾日的影响不显著。

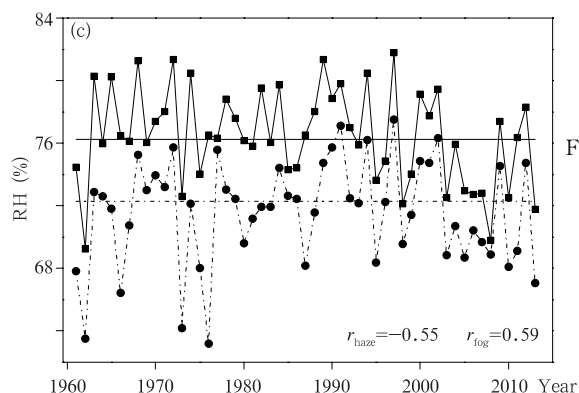
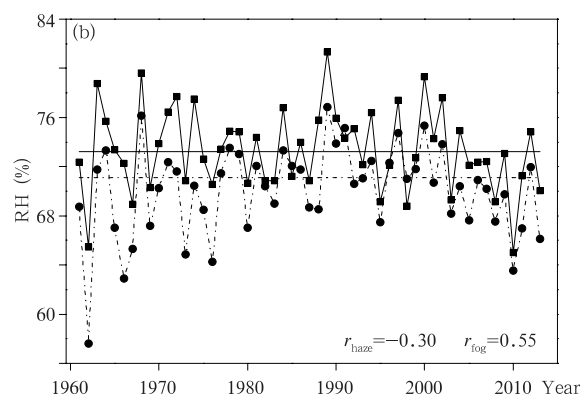
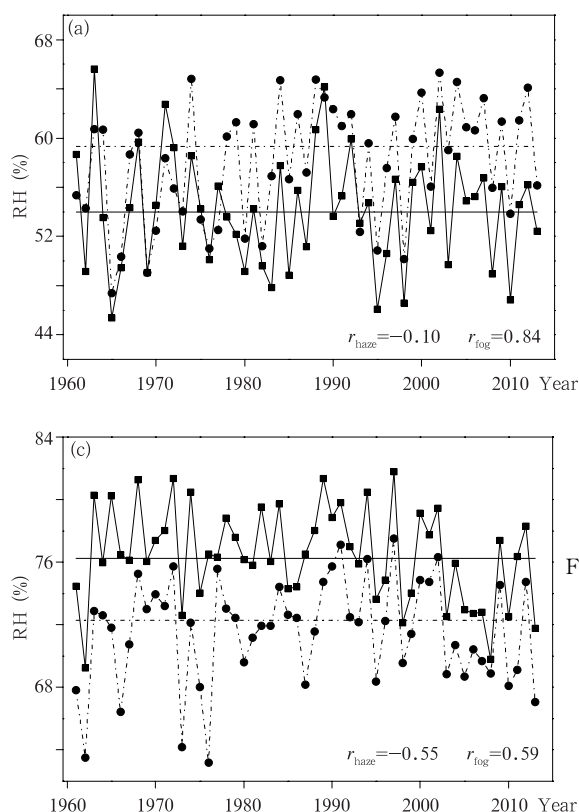


图9 1961—2013年华北(a)、江淮(b)和华南(c)冬季相对湿度(RH)的时序曲线(实线表示冬季平均相对湿度,虚线表示冬季霾日相对湿度;水平线表示1981—2010年气候平均值; r_{haze} 表示冬季霾日与平均相对湿度相关系数; r_{fog} 表示冬季雾日与平均相对湿度相关系数)
Fig. 9 Time series of the relative humidity (RH) during the period 1961–2013 over North China (a), Jianghuai Region (b) and South China (c) (the solid line shows the wintertime average relative humidity and the dashed line represents the relative humidity of wintertime haze days; the horizontal line is the climatic average during 1981–2010; the variable r_{haze} is the correlation coefficient between the wintertime haze days and wintertime average relative humidity; the variable r_{fog} is the correlation coefficient between the wintertime fog days and wintertime average relative humidity)

5.2 大气稳定性与霾的关系

大气层结表征大气中温度和湿度的垂直分布,大气稳定性与湿度也存在相互影响的关系。文中采用表征大气热力不稳定度的A指数分析华北、江淮和华南地区冬季霾日与大气稳定度的关系(章国材等,2007)。计算式为

$$A = (T_{850} - T_{500}) - [(T - T_d)_{850} + (T - T_d)_{700} + (T - T_d)_{500}] \quad (1)$$

式中, T 和 T_d 分别表示温度和露点温度,下标表示500、700和850 hPa。A指数值越大,表示大气越温暖,水汽越充分,层结越不稳定。

由1961—2013年冬季A指数和霾日距平的时序曲线(图10)可以看出,A指数与霾日数成相反的变化趋势。华北、江淮和华南地区在2002年之前A指数大多为正距平,大气处于相对不稳定的状态,2002年之后A指数均为负距平,大气处于相对稳定的状态,大气稳定度的改变可能也与气候变暖背景有关。3个区冬季霾日也是从2002年前后开始快速增多,这与大气由相对不稳定变为相对稳定状态不无关系。21世纪以来,随着城市人口的增长和工

业发展的加快、机动车辆的增加,污染物排放和悬浮物大量增多,而稳定的大气导致空气的垂直方向交换能力变弱,大量的污染物被限制在浅层大气,并逐渐累积成霾。由冬季A指数距平与霾日的相关系数可以看出,华北、江淮和华南地区均成明显的负相关,通过了0.001水平的显著性检验。

表3给出了A指数的各项因子与冬季霾日的相关系数,可以看出华南地区冬季霾日与大气稳定参数 $(T_{850} - T_{500})$ 成显著的负相关,而在华北和江淮地区这种相关性均比较弱。华北、江淮和华南地区冬季霾日与对流层中低层的空气饱和程度 $((T - T_d)_{850}$ 、 $(T - T_d)_{700}$ 和 $(T - T_d)_{500})$ 均成显著的正相关,通过了0.001水平的显著性检验,尤其是与500 hPa的大气湿度参数负相关性最强。 $(T - T_d)_{850}$ 、 $(T - T_d)_{700}$ 和 $(T - T_d)_{500}$ 的时序曲线(图略)与A指数的时间变化基本成相反的变化趋势,而与霾日的变化趋势基本一致,2002前后开始,华北、江淮和华南850至500 hPa中低层温度露点差显著增大,即大气饱和度显著下降,这说明3个区整个对流层中低层的大气都明显变干,空气不易达到饱和的状态,

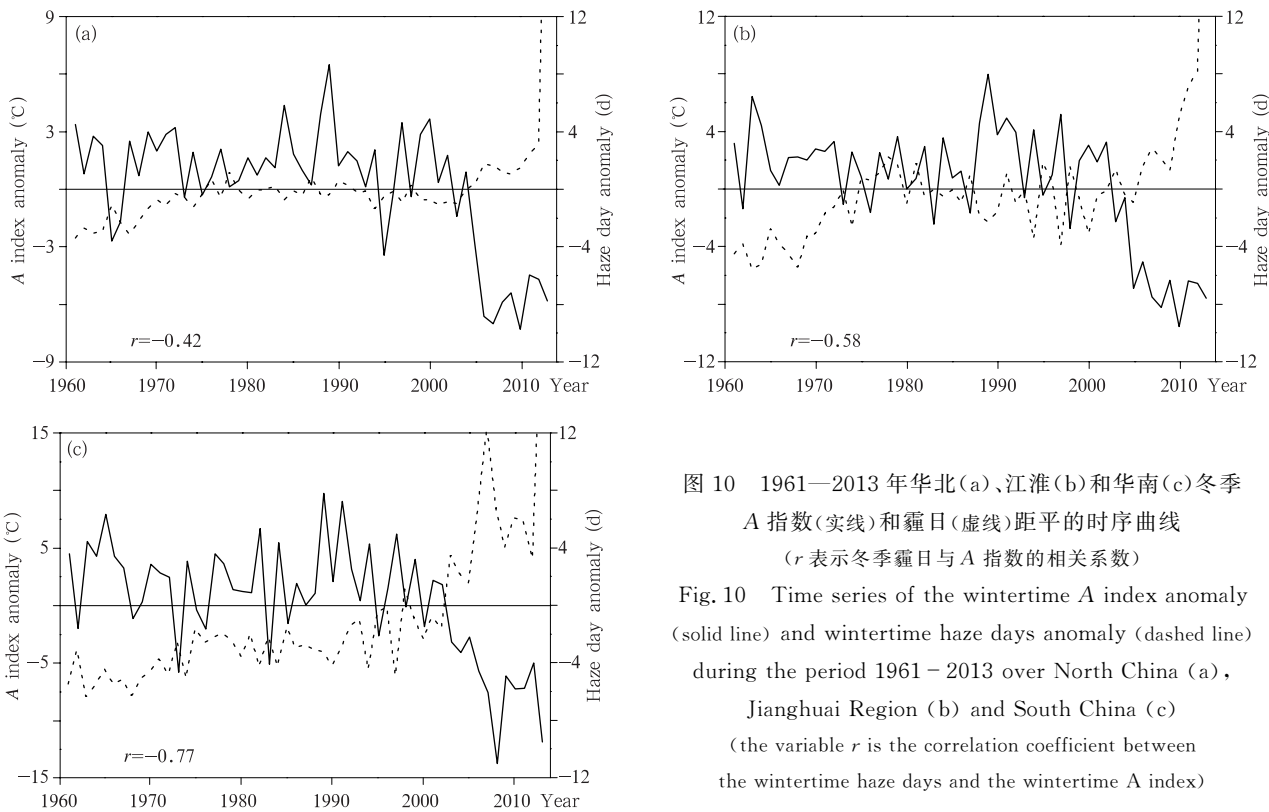


图 10 1961—2013 年华北(a)、江淮(b)和华南(c)冬季 A 指数(实线)和霾日(虚线)距平的时序曲线
(r 表示冬季霾日与 A 指数的相关系数)
Fig. 10 Time series of the wintertime A index anomaly (solid line) and wintertime haze days anomaly (dashed line) during the period 1961–2013 over North China (a), Jianghuai Region (b) and South China (c) (the variable r is the correlation coefficient between the wintertime haze days and the wintertime A index)

表 3 华北、江淮和华南冬季霾日与 A 指数公式各项因子的相关系数
Table 3 The correlation coefficient between the wintertime haze days and all the items of of A index over North China, Jianghuai Region and South China

	华北	江淮	华南
$T_{850} - T_{500}$	0.17	<u>-0.1</u>	<u>-0.35</u> *
$(T - T_d)_{850}$	0.43**	0.53**	0.41**
$(T - T_d)_{700}$	0.41**	0.51**	0.69**
$(T - T_d)_{500}$	0.45**	0.51**	0.74**

注: * 表示相关系数通过 0.05 水平的显著性检验; ** 表示相关系数通过 0.01 水平的显著性检验;黑体表示上升趋势,下划线表示下降趋势。

这对雾的形成、雾层发展的深厚以及雾-霾的转换都是不利的,而有利于中低层大气中霾的发展。

5.3 水汽输送与霾的关系

由于雾和霾粒子的吸湿性,水汽是雾和霾产生都不可缺少的一个条件。充足的水汽供应如果能使空气达到或接近饱和,则易形成雾;而水汽的供应增加但并不能使空气达到或接近饱和,则有利于霾的形成。

为了分析华北、江淮和华南地区冬季水汽收支的变化与霾日的关系,图 11 给出了 3 个区经向、纬向和总的整层水汽净收入的时间序列。可以看出,华北冬季总水汽收支与冬季霾日数的时间变化基本一致,结合相关系数表(表 4)可以看出,两者成显著的正相关。表明冬季水汽供应越多,冬季霾日也越

多,这是由纬向水汽收入和经向水汽收入共同作用的,华北相对比较干,相对湿度较低,外来的水汽输送使其空气湿度加大但还不易使空气达到饱和,这为霾的形成提供有利的条件。江淮地区纬向水汽收入与冬季霾日数的变化趋势基本一致,而经向水汽收入成反向变化趋势,由纬向、经向和总水汽收入与霾日数的相关系数,发现江淮冬季霾日数的变化与纬向水汽收入成显著的正相关,与经向水汽收入成显著的负相关,与总水汽收入相关不显著。这说明纬向输送来的并滞留在江淮地区的水汽增多有利于形成霾天气,而经向水汽收入的增多则不利于形成霾天气,可能更利于雾日的形成或者霾向雾的转换(计算经向水汽收入与雾日相关系数达到 0.26,通过了 0.05 水平的显著性检验)。华南地区冬季霾日

与总水汽收入和纬向水汽收入的相关均较弱,但与经向水汽收入成显著的负相关,表明由热带海洋输送的暖湿水汽越充足越不利于华南地区霾的形成,而更有利于雾的形成或者霾向雾的转换(计算经向水汽收入与雾日相关系数达到 0.65,通过了 0.001 水平的显著性检验)。注意到近 15 年,华北、江淮和

华南地区纬向水汽净收入均成显著上升趋势,华北经向水汽净收入也成上升趋势,但是江淮和华南地区的经向水汽净收入却成显著的下降趋势,3 个区纬向、经向水汽收入以及区域水汽净收入的变化均有利于冬季霾日的形成,这可能是近 10—15 年 3 个区冬季霾日数快速增多的原因之一。

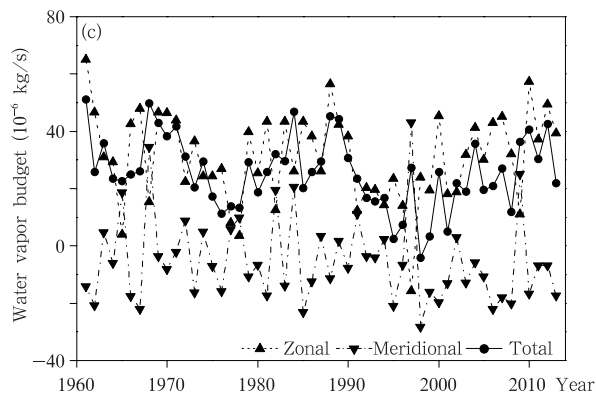
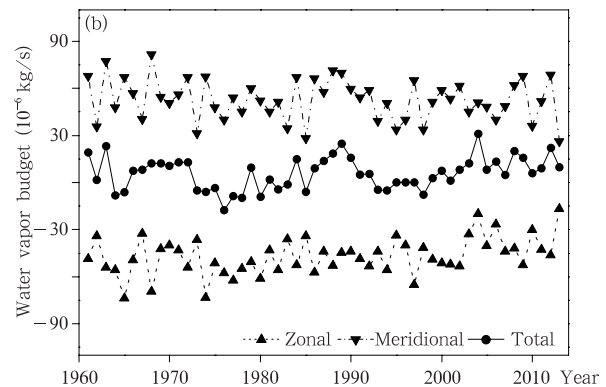
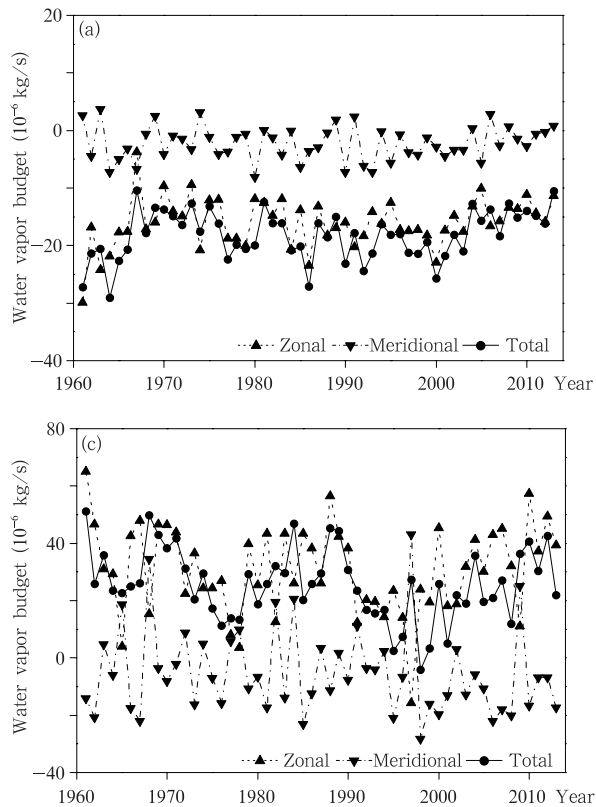


图 11 1961—2013 年华北(a)、江淮(b)和华南(c)冬季整层水汽净收入的时序曲线(正值表示流入,负值表示流出)
Fig. 11 Time series of the wintertime water vapor budget during the period 1961–2013 over North China (a), Jianghuai Region (b) and South China (c) (positive and negative values indicate the inflow and outflow of water vapor, respectively)

表 4 华北、江淮和华南冬季霾日数与整层水汽收入的相关系数
Table 4 The correlation coefficient between wintertime haze days and wintertime water vapor budget over North China, Jianghuai Region and South China

水汽收入	华北	江淮	华南
纬向	0.23	0.46 **	0.18
经向	0.16	-0.39 **	-0.34 **
总收入	0.33 **	0.04	-0.18

注: * 表示相关系数通过 0.05 水平的显著性检验; * * 表示相关系数通过 0.01 水平的显著性检验。

6 结 论

以华北、江淮和华南为研究区,分析了冬季霾日的长期变化特征,并在此基础上就东亚冬季风及大气湿度对 3 个区冬季霾日形成的差异做了进一步的探讨,得到以下结论:

(1)华北、江淮和华南地区 1961—2013 年冬季霾日总体都是成显著的上升趋势,尤其是进入 21 世纪以来,霾日增多明显。

(2)东亚冬季风的年代际减弱对华北、江淮和华南地区冬季霾日的年代际增多影响显著。在气候变暖的大背景下,东亚冬季风强度的减弱使得地面风速减小,这不利于污染物的扩散和稀释,对 3 个区冬季霾日的增多均有显著影响。其中,华北冬季日最大风速为 7—8 m/s 的日数和江淮冬季日最大风速为 6—8 m/s 的日数的减少,以及华南冬季日最大风速 ≤ 2 m/s 的日数的增多分别对各区冬季霾日的增多影响最为显著。东亚冬季风减弱所引起的地面气

温的持续上升对华北冬季霾日的增多影响显著,对江淮和华南没有显著的影响。

(3)分析发现江淮和华南地区冬季霾日与近地面相对湿度成显著的负相关,华北地区冬季霾日与近地面相对湿度的相关关系不显著。20 世纪 90 年代以来,由于气候变暖,近地面气温升高所引起的江淮和华南冬季相对湿度的降低使得雾-霾的转换减弱,这可能是江淮和华南霾日增多、雾日减少的一个原因。

(4)气候变暖,冬季气温的升高也有利于大气层结稳定度的增强,华北、江淮和华南地区冬季霾日的增多均与大气层结稳定度的增强显著相关,特别是与对流层中下层(850—500 hPa)大气饱和度的降低显著相关。表明 3 个区中低层大气变干,空气不易达到饱和,大气趋于稳定状态,这有利于整个中低层霾的发生和维持。

(5)华北地区的冬季霾日与水汽总收入成显著正相关,江淮地区与纬向水汽收入成显著正相关,与经向水汽收入成显著负相关,华南地区与经向水汽收入成显著负相关,与纬向水汽收入相关不显著。江淮和华南地区经向水汽收入增加(减少),不利于(有利于)霾的形成或持续,更有利于(不利于)雾的形成或霾向雾的转换。

上述的结果表明,中国中东部地区冬季霾的发生频次与东亚冬季风的年代际变化以及大气湿度的变化有着密切的关系。这说明虽然由于经济发展,能源消耗增大造成污染物排放的增多是霾天气增多的重要物质条件,但是环境因子对霾的形成也是一种重要的条件。

参考文献

丁一汇,柳艳菊. 2014. 近 50 年中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(1): 37-48. Ding Y H, Liu Y J. 2014. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in the recent 50 years and their relations with atmospheric humidity. Sci China: Earth Sci, 57(1): 36-46

符传博, 丹利. 2014. 重污染下中国中东部地区 1960—2010 年霾日数的时空变化特征. 气候与环境研究, 19(2): 219-226. Fu C B, Dan L. 2014. Spatiotemporal characteristics of haze days under heavy pollution over central and eastern China during 1960—2010. Climatic Environ Res, 19(2): 219-226 (in Chinese)

高歌. 2008. 1961—2005 年中国霾日气候特征及变化分析. 地理学报, 63(7): 761-768. Gao G. 2008. The climatic characteristics

and changes in haze days over China during 1961—2005. Acta Geogr Sinica, 63(7): 761-768 (in Chinese)

郭其蕴. 1994. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系. 应用气象学报, 5(2): 218-225. Guo Q Y. 1994. Relationship between the variation of the East Asian winter monsoon and temperature anomalies in China. J Appl Meteor Sci, 5(2): 218-225 (in Chinese)

贺圣平, 王会军. 2012. 东亚冬季风综合指数及其表达的东亚季风年际变化特征. 大气科学, 36(3): 523-538. He S P, Wang H J. 2012. An integrated East Asian winter monsoon index and its interannual variability. Chinese J Atmos Sci, 36(3): 523-538 (in Chinese)

胡亚旦. 2009. 中国霾天气的时空分布特征及其与气候环境变化的关系[D]. 兰州: 兰州大学. Hu Y D. 2009. Temporal variability and spatial distribution of haze in China and its association with climate change[D]. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese)

康杜娟, 王会军. 2005. 中国北方沙尘暴气候形势的年代际变化. 中国科学(D 辑): 地球科学, 35(11): 1096-1102. Kang D J, Wang H J. 2005. Analysis on the decadal scale variation of the dust storm in North China. Sci China (Ser D): Earth Sci, 48(12): 2260-2266

梁苏洁, 丁一汇, 赵南等. 2014. 近 50 年中国大陆冬季气温和区域环流的年代际变化研究. 大气科学, 38(5): 974-992. Liang S J, Ding Y H, Zhao N, et al. 2014. Analysis of the interdecadal changes in the wintertime surface air temperature over mainland China and regional atmospheric circulation characteristics during 1960—2013. Chinese J Atmos Sci, 38(5): 974-992 (in Chinese)

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(5): 313-318. Song L C, Gao R, Li Y, et al. 2013. Analysis of China's haze days in the winter half year and the climatic background for haze formation during 1961—2012. Adv Climate Change Res, 9(5): 313-318 (in Chinese)

王宝鉴, 黄玉霞, 陶健红等. 2006. 西北地区大气水汽的区域分布特征及其变化. 冰川冻土, 28(1): 15-21. Wang B J, Wang Y X, Tao J H, et al. 2006. Regional features and variations of water vapor in Northwest China. J Glaciol Geocryol, 28(1): 15-21 (in Chinese)

王丽萍, 陈少勇, 董安祥. 2005. 中国雾区的分布及其季节变化. 地理学报, 60(4): 689-697. Wang L P, Chen S Y, Dong A X. 2005. Spatial distribution and seasonal variation of fog in China. Acta Geogr Sinica, 60(4): 689-697 (in Chinese)

王珊, 修天阳, 孙扬等. 2014. 1960—2012 年西安地区雾霾日数与气象因素变化规律分析. 环境科学学报, 34(1): 19-26. Wang S, Xiu T Y, Sun Y, et al. 2014. Changes in mist and haze days and relevant meteorological elements during 1960—2012 in Xi'an. Acta Scient Circumstant, 34(1): 19-26 (in Chinese)

王跃, 王莉莉, 赵广娜等. 2014. 北京冬季 PM_{2.5} 重污染时段不同尺

- 度环流形势及边界层结构分析. 气候与环境研究, 19(2): 173-184. Wang Y, Wang L L, Zhao G N, et al. 2014. Analysis of different-scale circulation patterns and boundary layer structure related to heavy PM_{2.5} pollutions in Beijing during the winter. Climatic Environ Res, 19(2): 173-184 (in Chinese)
- 吴兑. 2006. 再论都市霾与雾的区别. 气象, 32(4): 9-15. Wu D. 2006. More discussions on differences between haze and fog in urban areas. Meteor Mon, 32(4): 9-15 (in Chinese)
- 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇等. 2006. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究. 气象学报, 64(4): 510-517. Wu D, Bi X Y, Deng X J, et al. 2006. Effects of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pearl River Delta. Acta Meteor Sinica, 64(4): 510-517 (in Chinese)
- 吴兑, 吴晓京, 李非等. 2010. 1951—2005 年中国大陆霾的时空变化. 气象学报, 68(5): 680-688. Wu D, Wu X J, Li F, et al. 2010. Temporal and spatial variations of haze during 1951—2005 in mainland China. Acta Meteor Sinica, 68(5): 680-688 (in Chinese)
- 吴兑. 2011. 灰霾天气的形成与演化. 环境科学与技术, 34(3): 157-161. Wu D. The formation and evolution of haze weather. Environ Sci Technol, 2011, 34(3): 157-161 (in Chinese)
- 晏红明, 段玮, 肖子牛. 2003. 东亚冬季风与中国夏季气候变化. 热带气象学报, 19(4): 367-376. Yan H M, Duan W, Xiao Z N. 2003. A study on the relation between the East Asian winter monsoon and climate change during rainy season in China. J Trop Meteor, 19(4): 367-376 (in Chinese)
- 尹志聪, 王会军, 袁东敏. 2015. 华北黄淮冬季霾年代际增多与东亚冬季风的减弱. 科学通报, 60(15): 1395-1400. Yin Z C, Wang H J, Yuan D M. 2015. Interdecadal increase in haze in the winter over North China and the Huang-huai Area and the weakening of the East Asian Winter Monsoon. Chin Sci Bull, 60(15): 1395-1400 (in Chinese)
- 章国材, 矫梅燕, 李延香. 2007. 现代天气预报技术和方法. 北京: 气象出版社, 371pp. Zhang G C, Jiao M Y, Li Y X. 2007. Techniques and Methods for Contemporary Weather Forecast. Beijing: China Meteorological Press, 371pp (in Chinese)
- 张利, 吴润, 张武. 2011. 1955—2000 年中国能见度变化趋势分析. 兰州大学学报(自然科学版), 47(6): 46-55. Zhang L, Wu J, Zhang W. 2011. An analysis of visibility variation in China from 1955 to 2000. J Lanzhou Univ (Nat Sci), 47(6): 46-55 (in Chinese)
- 张蓬勃, 管兆勇, 邵鹏程等. 2015. 江苏冬季霾日数的年代际变化与环流异常和区域增暖的可能联系. 热带气象学报, 31(1): 103-111. Zhang P B, Guan Z Y, Shao P C, et al. 2015. Interdecadal changes in wintertime hazy days in Jiangsu Province and their association with circulation anomalies and regional warming trends. J Trop Meteor, 31(1): 103-111 (in Chinese)
- 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 D: 地球科学, 44(1): 27-36. Zhang R H, Li Q, Zhang R N. 2014. Meteorological conditions for persistent severe fog and haze events over eastern China in January 2013. Sci China D: Earth Sci, 57(1): 26-35
- 中国气象局. 2007. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 6-7. China Meteorological Administration. 2007. Ground Meteorological Observation Specification. Beijing: China Meteorological Press, 6-7 (in Chinese)
- Gao H, Li X. 2015. Influences of El Nino Southern Oscillation events on haze frequency in eastern China during boreal winters. Int J Climatol, 35(9): 2682-2688, doi: 10.1002/joc.4133
- Song Y F, Liu Y J, Ding Y H. 2012. A study of surface humidity changes in China during the recent 50 years. Acta Meteor Sinica, 26(5): 541-553
- 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): 1-9
- Wang L L, Zhang N, Liu Z R, et al. 2014. The influence of climate factors, meteorological conditions, and boundary-layer structure on severe haze pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region during January 2013. Adv Meteor, 2014: 685971
- Wu J, Fu C B, Zhang L Y, et al. 2012. Trends of visibility on sunny days in China in the recent 50 years. Atmos Environ, 55: 339-346
- Zhu J L, Liao H, Li J P. 2012. Increases in aerosol concentrations over eastern China due to the decadal-scale weakening of the East Asian summer monsoon. Geophys Res Lett, 39(9): L09809