



专题: 2013 年 1 月中国东部严重雾霾天气

论 文

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

丁一汇*, 柳艳菊

中国气象局国家气候中心, 北京 100081

* E-mail: dingyh@cma.gov.cn

收稿日期: 2013-06-24; 接受日期: 2013-09-28; 网络版发表日期: 2013-12-18

国家重点基础研究发展计划(编号: 2012CB417205, 2013CB430202)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 41130960)和国家科技支撑计划(编号: 2009BAC51B02)资助

摘要 根据近 50 年(1961~2011 年)我国雾和霾台站长期观测资料的分析得到, 雾日发生的频率呈先增(1980 年之前)后减(1990 年后)的变化, 尤其是 1990 年以后明显减少, 这与气候变暖引起的近地面相对湿度减小的趋势一致, 而霾日发生的频率总体上呈增加的趋势. 据此, 本文进一步讨论了大气湿度减少在雾-霾转变中的作用, 结果表明霾日的平均相对湿度在 69% 左右, 比以前得到的值低, 这意味着霾粒子更不易向雾滴转换, 这可能是导致雾日减少的主要环境因子之一; 雾和霾转换的相对湿度阈值平均为 82% 左右, 这个值也低于以前得到的值, 因而在气候变暖条件下, 主要由于温度和饱和比湿增加导致的中国近地面相对湿度减少对雾和霾形成的环境条件可能产生了明显的影响. 本文也研究了霾与能见度的关系, 结果表明随着霾日发生频率的增加, 能见度有明显的下降, 从 1961 年至今平均能见度从 4~10 km 减小到 2~4 km, 大约下降一半左右.

关键词

雾和霾
能见度
相对湿度
雾-霾转换

2013 年 1 月, 我国中东部地区持续遭遇雾、霾天气影响, 在这场遍及中国东部大范围地区的雾、霾过程中, 北京市污染尤为严重, 长时间达到极重污染程度, 即最高的污染级别, 为此北京市气象台发布北京气象史上首个霾橙色预警. 因此, 关于雾、霾的问题日益成为人们关注的重点. 至今已有的研究涉及许多方面(丁一汇等, 2009; 吴兑等, 2009; 张小曳等, 2009), 其中关于雾、霾长期变化特征方面的研究主要是利用气象台站的观测资料进行分析, 得到的主要结果基本一致, 即我国年霾日呈现出明显上升的趋势, 相反雾日呈减少的趋势(刘小宁等, 2005; 王丽萍

等, 2006; 高歌, 2008; 胡亚旦和周自江, 2009; 吴兑等, 2010, 2011; 孙彧等, 2013). 另一方面是研究了雾、霾与能见度的关系, 得到中国东部多数地区大气能见度呈下降趋势, 尤其以珠江三角洲地区能见度下降最显著, 在 20 世纪 80~90 年代初期下降趋势更为明显(张利等, 2011; 第二次气候变化国家评估报告编委会, 2011). 造成上述变化的原因除了与经济规模的迅速扩大和城市化进程的加快导致气溶胶排放物的增加有密切关系外, 人类活动导致的气候变暖所引起的气候条件变化很可能也是这种变化发生的重要条件之一, 其中主要的原因是地表温度增加后

中文引用格式: 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

英文引用格式: Ding Y H, Liu Y J. 2014. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity. Science China: Earth Sciences, 57: 36~46, doi: 10.1007/s11430-013-4792-1

通过克劳修斯-克拉贝龙方程, 使地表饱和比湿增加, 如果实际比湿不增加, 则使相对湿度减少, 在这方面国内的研究还不是很多(Song 等, 2012). 本文在全面分析我国雾、霾的长期变化趋势与季节和区域变化特征基础上, 重点研究引起这种变化的相关气候条件, 尤其是气候变暖条件下大气湿度变化在雾-霾转变中的作用, 这对于深入认识雾、霾长期变化的原因与雾-霾转换宏观气象条件的变化十分有益.

1 资料和方法

本文所用的资料主要为国家气象信息中心最新整编的经过质量控制和检验的 1951~2011 年全国雾、霾、能见度和相对湿度等逐日数据; 能见度资料为 1951~2011 年一天四次观测资料. 在进行数据分析前, 首先对上述数据进行了进一步的筛选, 选取了 1961~2011 年连续无缺测的全国 553 站资料进行分析. 值得指出的是, 长期以来, 我国观测员对霾和轻雾的识别存在差别, 全国没有统一的辅助判别标准, 南方往往使用相对湿度辅助判别而相对湿度又定得太低, 因此直接使用地面观测的天气现象资料分析霾日可能不够客观. 对于使用长期气候资料进行霾的统计, 需要统一的定量标准, 因而需要使用能见度、天气现象、相对湿度来综合判断, 国际上是这样做的. 他们都用相对湿度 90%来区分轻雾与霾, 这样既可将雾中被误报的霾分离出来, 又可把霾中被误报的雾分离出去(Schichtel 等, 2001; Doyle 和 Dorling 等, 2002).

需要特别说明的是关于能见度资料, 根据中国气象局在 1955~1979 年《气象观测暂行规范(地面部分)》的观测方法中能见度观测, 能见度资料以等级的方式记录, 而自 1980 年起执行新的《地面气象观测规范》, 能见度资料以千米记录, 其对照关系见表 1. 由于能见度资料在 1980 年前后记录方式上不一致, 因此需要对资料进行一致性处理, 这里我们把 1980~2011 年所有站点逐日能见度观测资料转换为能见度等级(张利等, 2011).

中国的雾、霾天气主要分布在中东部地区, 而西部地区发生的频率相对要少. 为了更仔细地描述中国东部地区雾与霾的区域特征, 本文根据气候条件和温度变化特征把我国东部地区进一步划分成为 4 个子区(Song 等, 2012), 分别标记为 I 区($42^{\circ}\sim 54^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$)、II 区($35^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$)、III 区

表 1 能见度等级与水平距离对照表

能见度等级	能见度距离 L (km)
0 级	$L < 0.05$
1 级	$0.05 \leq L < 0.2$
2 级	$0.2 \leq L < 0.5$
3 级	$0.5 \leq L < 1.0$
4 级	$1.0 \leq L < 2.0$
5 级	$2.0 \leq L < 4.0$
6 级	$4.0 \leq L < 10.0$
7 级	$10.0 \leq L < 20.0$
8 级	$20.0 \leq L < 50.0$
9 级	$50 \leq L$

($27^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 和 IV 区($22.5^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$), 分别表示东北、华北、江淮和华南 4 个区域(图 1).

2 霾和雾的长期变化趋势

在大气观测上, 霾主要由两个气象变量判定: (1) 水平能见度小于 10 km; (2) 相对湿度一般小于 80%. 因而当大气相对湿度小于 80%时, 大气浑浊视野模糊导致的能见度变化主要是霾造成的(吴兑等, 2009). 图 2(a)是 1961~2011 年全国平均年霾日数的时间演变曲线. 可以看到, 在这 50 年中, 最近 30 年(1981~2010 年)年霾日数的气候平均值为 7.4 d, 霾日长期演变的总体特征是呈不断增加的趋势. 在 20 世纪 60 年代全国平均年霾日在 2~4 d, 而到近 5 年则上升到 11~16 d, 几乎增加了 5 倍, 这一趋势大致与第二次气候变化国家评估报告中的结果一致(第二次气候变化国家评估报告编委会, 2011), 但平均霾日数普遍比后者偏高, 尤其是近 8~10 年平均增长率为 $2.3 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$. 另一变化特征是, 在总体上升过程中, 可以划分为 3 个阶段, 20 世纪 60~70 年代是缓慢上升阶段, 平均上升率为 $2.3 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$; 20 世纪 80~90 年代是平稳阶段, 维持在每年平均 5.2 天的霾日; 从 2001 年开始到 2011 年, 是快速上升阶段, 上升率平均为 $8.8 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$. 为什么最近十年霾日出现如此快速上升的趋势, 其原因尚不清楚, 这可能主要是由于化石燃烧的迅速增加或气候变化导致的区域大气环流型变化引起的, 对此需要进一步研究.

如果考察一下各个季节霾日的长期变化(图 2(b)~(e)), 可以得出以下几个特点: (1) 冬季平均霾日最

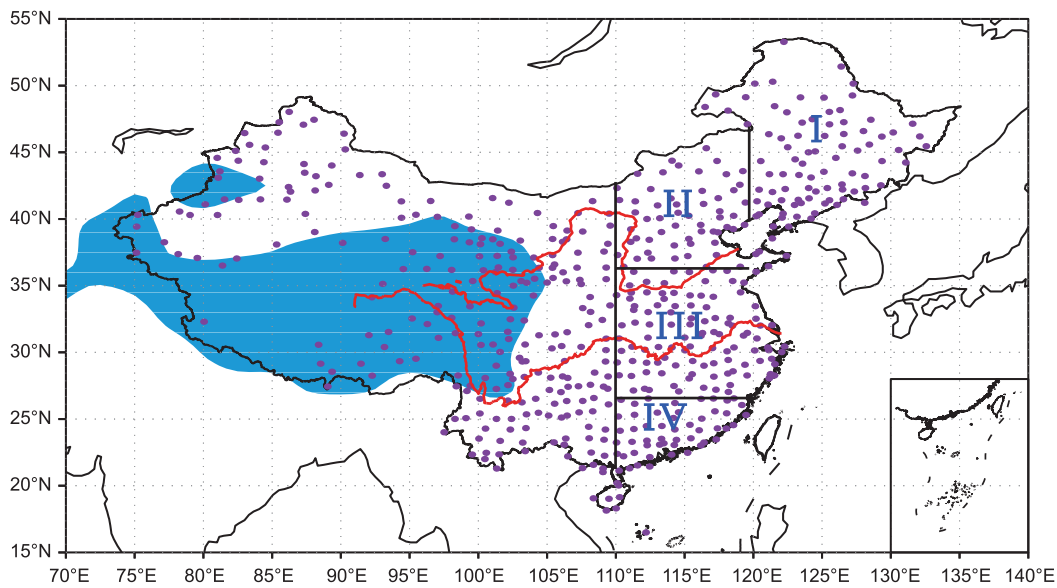


图 1 中国测站站点分布和分区

阴影部分表示青藏高原

多, 为 3.1 d; 夏季最少, 为 0.8 d; 春季和秋季分别为 1.6 d 和 2.0 d. 因而, 冬季是霾日最多季节, 其次是秋季和春季, 夏季最少; (2) 冬春季霾日的长期演变和年霾日的演变相似, 呈现出三个阶段的变化, 而夏季在 2000 年前的 40 年间基本上维持平稳状态, 只是从 2001 年开始明显上升, 从平均 0.6 d 上升到 2 d, 这是十分值得注意的现象. 秋季的变化十分不同, 它没有 20 世纪 70~80 年代近 20 年的平稳阶段, 而表现出 50 年中持续不断上升的趋势. 上述霾日的季节差异不大可能与污染源排放的差异有关, 可能更主要与大气环流条件(包括风场、层结条件、水汽、温度以及降水等条件)有关.

图 3 是 1961~2011 年全国年霾日的变化趋势空间分布图, 可以看到, 在过去 50 年中霾日增加的地区主要在中国的东部地区, 而在中西部地区出现减少的平均趋势, 东北地区总体上也表现出减少趋势, 这一结果与高歌(2008)和吴兑等(2009)的统计结果基本一致. 华北、江淮、江汉和华南等地是正变化趋势最显著的地区, 这些地区也是中国工业和经济快速发展最快、同时也是污染物排放最多的地区. 如果进一步考察一下东北、华北、江淮和华南年霾日的长期变化, 可以更清楚地看到这种地区差异(图 4). 十分有意思的是东北地区(图 4(a))在 1980 年以前霾日是高峰期, 平均在 2 d 左右, 之后则明显下降, 基本上处

于 0.6 d 左右, 因而近 30 年东北地区的霾日处于很低的水平. 但是在江淮和华南地区都是呈不断上升的趋势, 尤其是华南在 20 世纪 60 年代平均只有 3.9 d a^{-1} 霾日, 到 2008 年迅速增加到近 60 d a^{-1} , 但最近几年出现明显下降趋势. 华北地区在 1980 年之前是明显快速上升的, 在 1976~1990 年这 15 年达到高峰, 平均约为 $14\sim15 \text{ d a}^{-1}$, 以后一直下降, 但从 2005 年又开始上升. 夏季霾日的平均水平是四季中最低的, 只有 0.8 d, 冬季为 4 d. 华北春秋季节霾日并没有明显的增加.

对雾的统计分两种情况: 雾和轻雾. 雾一般是指能见度小于 1 km, 相对湿度接近 100%(饱和)条件下由水汽凝结(或凝华)产生的天气现象, 而轻雾的水平能见度通常在 1~10 km, 相对湿度低于 100%, 但大于 95%. 轻雾有时也称霭. 从雾强度划分, 雾一般是轻雾以上的大雾、浓雾和强浓雾(重雾)三种雾的总称(大雾能见度小于 0.5 km, 浓雾能见度小于 0.2 km, 强浓雾能见度则小于 0.05 km). 可见, 雾的能见度最差(小于 1 km), 轻雾的能见度范围为 1~10 km, 霾的能见度范围为 0~10 km. 由上述雾和霾的意义可见, 相对湿度是区分雾和霾的关键气象参数. 因而如果由雾转化为霾, 通常能见度会提高. 过去的研究表明, 在相对湿度为 80%~95%, 通常是雾与霾共存或者是雾-霾的转换阶段.

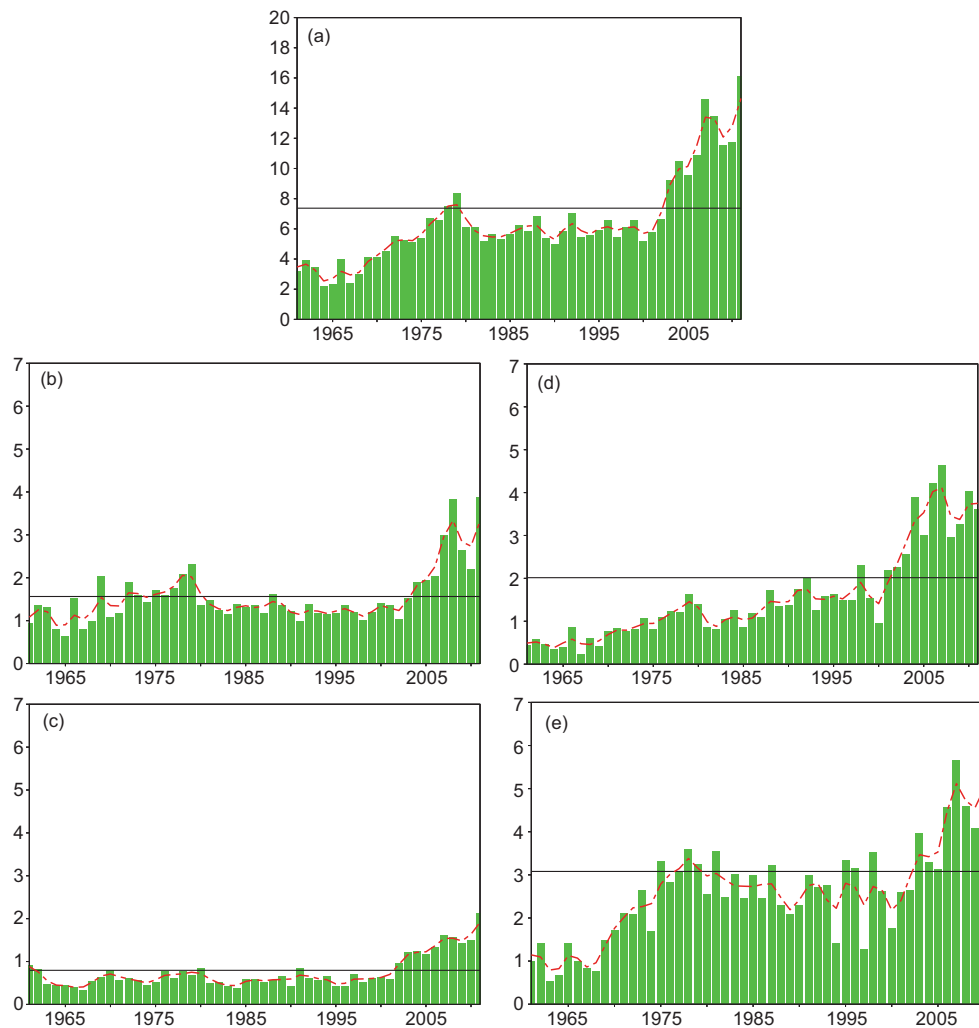


图 2 1961~2011 年全国平均霾日数的历年变化

(a) 年变化; (b) 春季(3~5 月); (c) 夏季(6~8 月); (d) 秋季(9~11 月); (e) 冬季(12 月至次年 2 月). 黑色粗实线为 1981~2010 年气候平均; 红色虚线表示 9 点平滑曲线. 单位: d

图 5 是 1961~2011 年全国年雾日和轻雾长期变化曲线. 在 1980 年之前, 雾日是缓慢增加的, 由 20 世纪 60 年代的平均 20 d 增加到 24 d, 以后大致维持到 20 世纪 80 年代末. 从 1990 年以后, 雾日迅速减小, 到 2011 年降到 15 d. 也就是说在 20 世纪 80 年代之前, 雾和霾两者都是增加的, 以后两者也都有一个平稳期, 但 1990 年之后两者变化逐步趋于反向, 雾日减少, 而霾日增加, 这种反向变化的一个重要原因与大气温度和湿度条件的变化有密切关系, 关于这一点将在第 4 节中讨论. 另一方面, 十分有意思的是轻雾日在 2006 年之前一直是增加的, 只有近 5 年才出现缓慢的下降, 其总趋势与霾日的长期趋势是相似

的. 造成这种现象的一个原因是大气相对湿度的降低, 另一方面可能是在实际观测中难于区分霾和轻雾的差异, 在轻雾的观测中, 也可能包括霾日.

图 6 是中国东部四个地区年雾日的平均曲线, 在东北(图 6(a))雾日是不断减少的, 在 20 世纪 60~70 年代, 年雾日平均在 18 d 左右; 2000 年以后已下降到平均 13 d 左右. 华北的情况不同(图 6(b)), 在 1990 年以前雾日是增加的. 从 20 世纪 60 年代的 17 d 增加到 90 年代的 28 d 左右, 以后不断下降, 这与霾日的变化大致相似(图 4(a)), 只是近些年不像霾日又呈上升趋势. 江淮地区的情况与华北相近, 也出现先升后降的演变特征, 但雾日发生的平均天数明显大于华北,

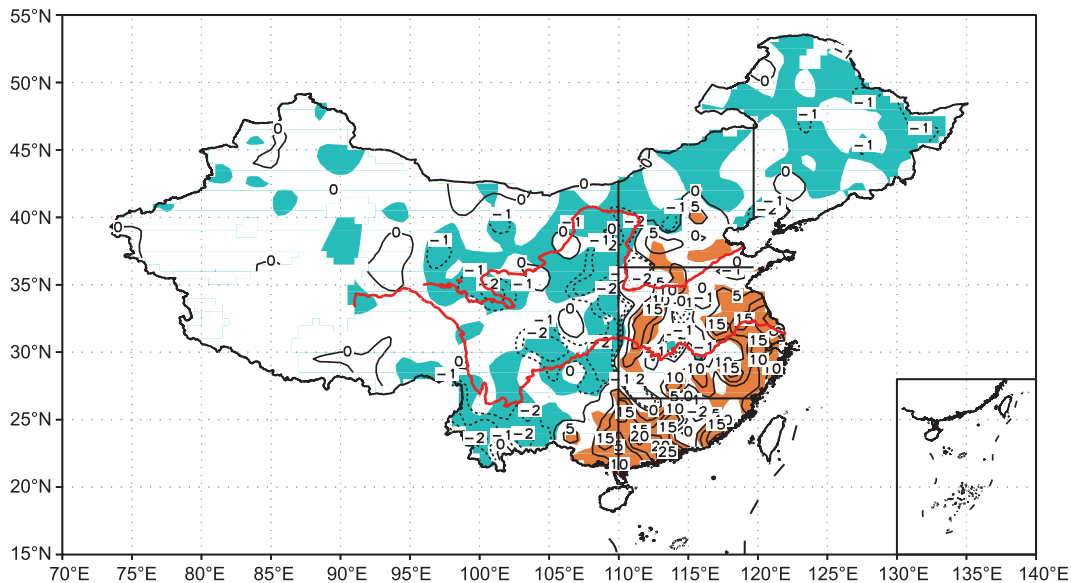


图 3 1961~2011 年全国年霾日变化趋势分布

阴影区为平均趋势通过 95% 信度检验的地区。棕色表示增加趋势; 青色表示减少趋势。正值区等值线间隔为 $5 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$, 负值区等值线间隔为 $1 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$

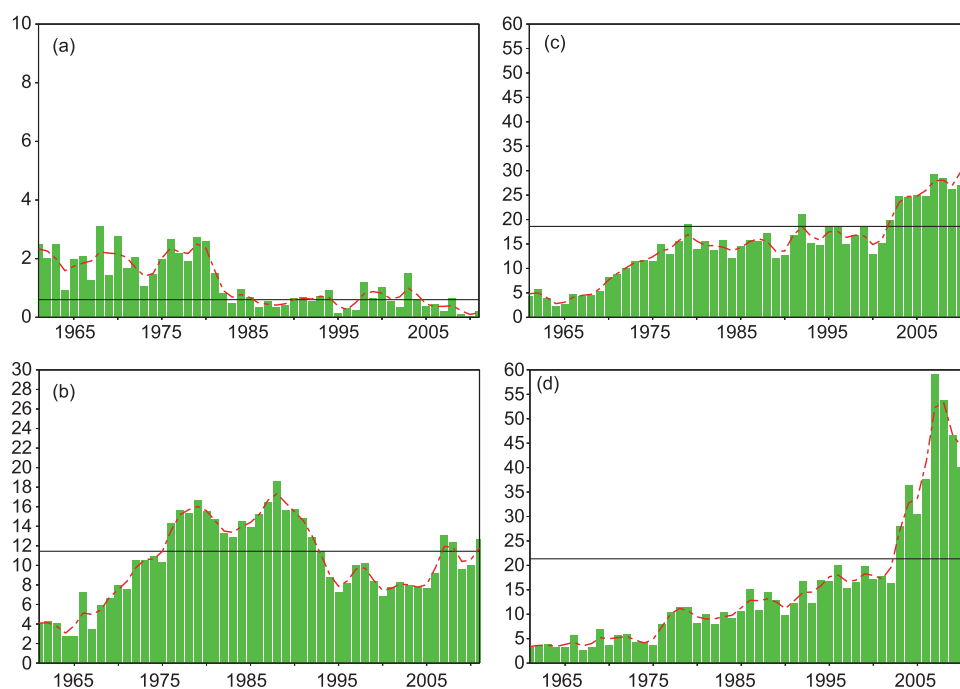


图 4 1961~2011 年中国东部分区年霾日的历年变化

(a) 东北; (b) 华北; (c) 江淮; (d) 华南. 黑色粗实线为 1981~2010 年气候平均; 红色虚线表示 9 点平滑曲线. 单位: d

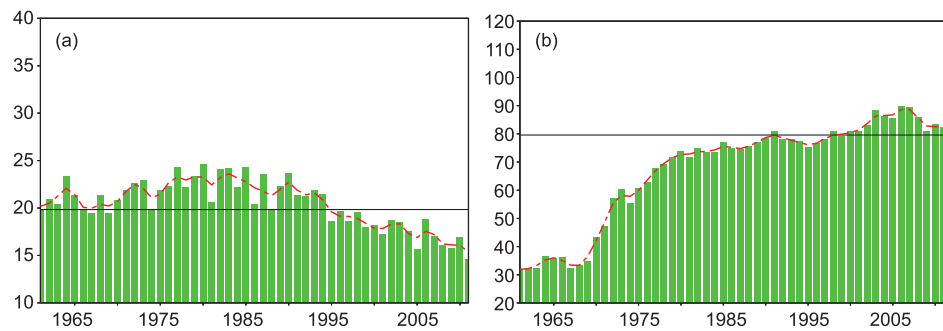


图 5 1961~2011 年全国平均年雾日(a)和轻雾日(b)的历年变化

黑色粗实线为 1981~2010 年气候平均; 红色虚线表示 9 点平滑曲线. 单位: d

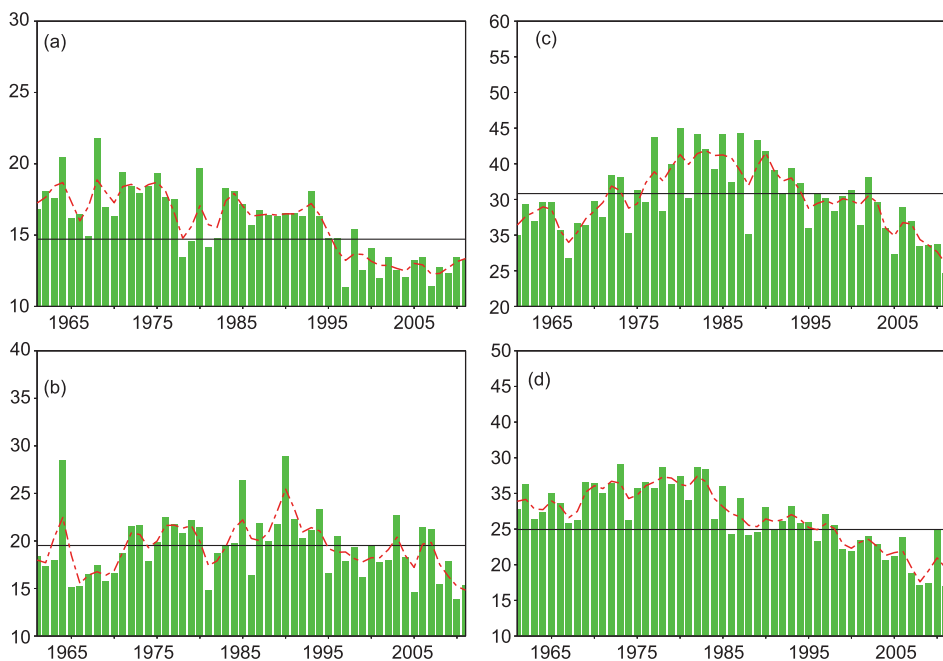


图 6 1961~2011 年中国东部分区年雾日的历年变化

(a) 东北; (b) 华北; (b) 江淮; (d) 华南. 黑色粗实线为 1981~2010 年气候平均; 红色虚线表示 9 点平滑曲线. 单位: d

在 20 世纪 80 年代雾日出现变多的时期, 年平均雾日达 43 d 左右. 华南地区雾日从 20 世纪 60 年代出现缓慢上升后, 到 1982 年前后达到峰值(年平均 33 d 左右), 之后即迅速下降到最近的 18 d 左右, 几乎减少了一倍, 并且雾日的下降时间也比华北和江淮地区早 8 年左右. 轻雾对于上述中国东部四个分区都是明显上升的, 尤其是在 1980 年以前, 1980 年以后除华南维持上升外, 其他三区大致维持平稳状态(图略). 由上可见, 雾日的变化在 1980 年以后是一致的, 都是快速上升趋势, 然后维持一段平稳期. 而从 20 世

纪 90 年代雾日开始减少, 与霾日总体上增加呈现反向的变化, 这种情况约有 20 年的时间. 轻雾的变化则不同, 总体上呈现出与霾日相近的长期变化.

3 雾和霾与能见度的关系

从天气现象观测上, 雾与霾是增加大气浑浊度导致水平能见度下降或恶化的主要影响因子. 近 20 年霾日的发生频率增高, 已成为所有影响视程障碍的天气现象中最重要的现象之一. 首先由图 7 可以看

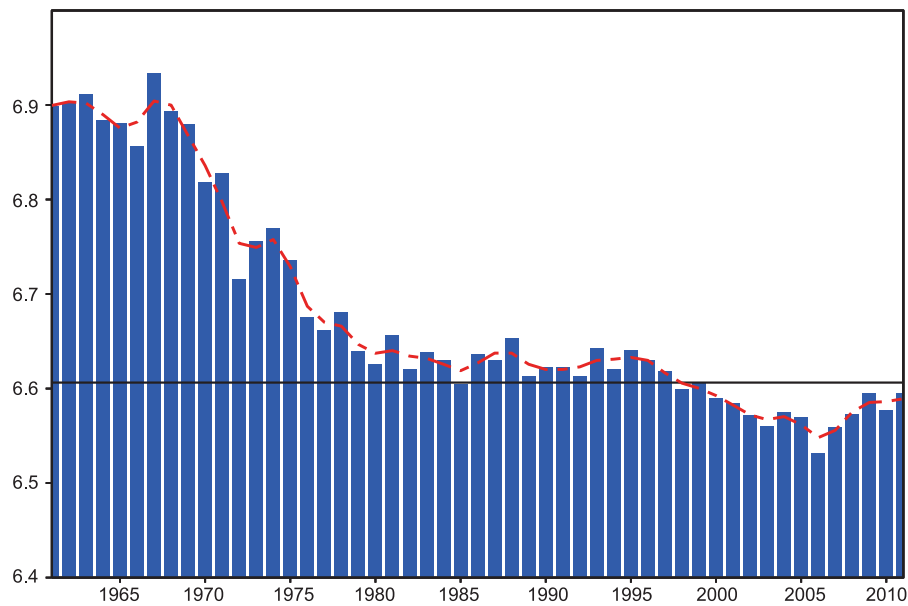


图 7 1961~2011 年全国平均能见度的历年变化

黑色粗实线为 1981~2010 年气候平均; 红色虚线表示 9 点平滑曲线. 单位: 级

到, 从 20 世纪 60 年代中国地区年平均能见度是呈持续下降趋势的, 尤其是在 1980 年之前, 由 10 km 左右 (约 6.9 级) 降至 5 km 左右 (约 6.6 级), 以后能见度维持一个平稳期. 但最近 20 年, 约从 1995 年又出现第二个较明显的下降期.

图 8 进一步给出了雾日和霾日条件下全国平均年能见度变化曲线. 根据第 1 节中的说明, 1961 年以来的能见度资料皆化为能见度等级 (表 1). 等级越小, 说明能见度越差. 由图 8 可以看到 2 个特征: (1) 霾日的能见度在 5.5~6.3 级范围, 大致对应于 2~10 km; 而雾日的能见度平均约为 5.1 级左右, 大致在 2 km 左右. 因而平均而言, 雾日的能见度要低于霾日. 由于雾的强度在一天中是有变化的而且局地性很强, 此外有时难以区分轻雾与浓雾或重雾的确切等级, 可能在本文的浓雾统计中包含了一些轻雾的样本. (2) 霾日和雾日的能见度从 1961 年开始都呈不断下降的趋势, 平均能见度均降低了一个量级, 特别是在 20 世纪 90 年代后, 雾日和霾日的平均能见度水平均低于平均值.

这里特别把能见度 ≤ 3 级 (小于 1 km) 的严重雾日 (包括浓雾和重雾) 与 4 级 $\leq$ 能见度 < 5 级 (≥ 1 km, 小于 4 km) 的严重霾日挑选出来, 考察严重雾日和霾日条件下能见度的长期变化 (图 9). 可以看到重霾日的

能见度与所有霾日能见度平均水平连续降低的特征基本相近. 但严重雾日和雾日的能见度曲线有明显不同, 其平均能见度水平为 1.9~2.2 级 (0.2 km 左右), 能见度很低, 并且表现出明显的年代际变化趋势. 20 世纪 70 年代前重雾日的能见度水平很低, 平均小于 2.1 级, 20 世纪 70 年代后能见度水平明显增加; 从 20 世纪 80 年代初重雾日的能见度再次降低; 从 1993 年开始重雾日的能见度水平开始又呈上升变化, 这种年代际尺度的能见度变化与东亚夏季风强度的年代际变化相近 (Ding 等, 2008), 但与其相关的内在原因需进一步研究. 另外, 应该指出浓雾和重雾日的长期变化趋势在过去 50 年中所占比例一直是连续增加的, 从 20 世纪 60 年代占总雾日的 7% 上升到 2011 年的 12%, 特别是在 1990 年前主要呈线性增加的趋势, 1990 年后, 这种增加的趋势明显放缓 (图 10(a)). 同时, 严重霾日在总霾日中占的比例在 1990 年以前也是呈不断上升的趋势, 由 20 世纪 60 年代的 2% 增加到 90 年代的 10% 左右. 从 2000 年以后, 重霾日在总霾日的比例开始表现出明显减小的趋势 (图 10(b)). 由上面的分析可见, 雾日、霾日各具有不同的能见度水平, 雾日最低、霾日较高, 并且不论是所有霾日还是严重霾日, 其能见度在近 50 年中都是连续下降的. 此外, 对于严重雾日和霾日其在总雾日和霾日中所

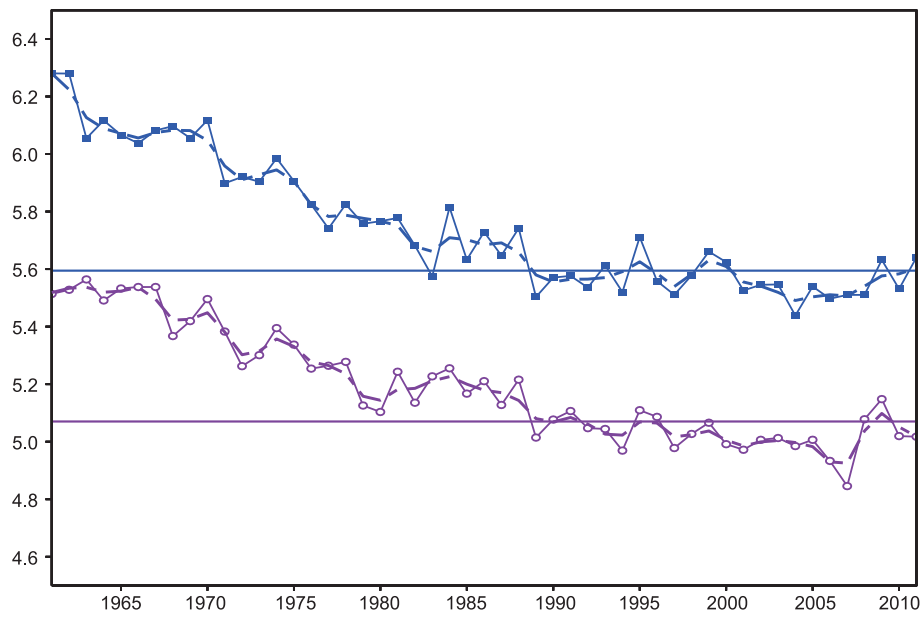


图 8 1961~2011 年雾日和霾日天气条件下全国年平均能见度的时间演变

实心方框表示霾天, 空心圆表示雾天; 粗实线为 1981~2010 年气候平均; 虚线表示 9 点平滑曲线. 单位: 级

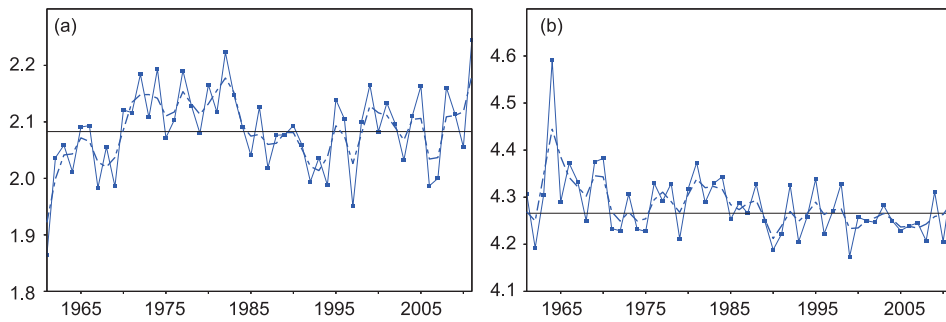


图 9 1961~2011 年严重雾霾日天气条件下的全国年平均能见度的时间演变

(a) 能见度 ≤ 3 级(小于 1 km)的雾日(即浓雾和重雾); (b) 4 级 $\leq$ 能见度 < 5 级(≥ 1 km, 小于 4 km)的严重霾日. 单位: 级

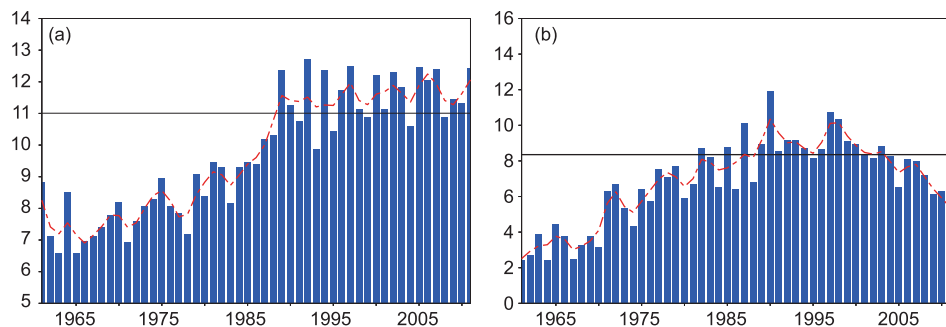


图 10 1961~2011 年严重雾日和霾日与总雾日和霾日之比的时间演变

(a) 能见度 ≤ 3 级(小于 1 km)的雾日(即浓雾和重雾); (b) 4 级 $\leq$ 能见度 < 5 级(≥ 1 km, 小于 4 km)的霾日. 黑色粗实线为 1981~2010 年气候平均; 红色曲线为 9 点平滑. 单位: %

占的比例在 1990 年之前一直呈线性增加的趋势, 1990 年后严重雾日的比例基本维持一个较为稳定的水平, 大约为 11%~12%; 而严重霾日除在 20 世纪 90 年代表现出明显的波动变化外, 2000 年后重霾日的比例表现出明显减小的趋势。

4 雾与霾形成和转换的大气湿度条件

一般来说, 雾形成于近地面空气达到或接近饱和的条件下, 即相对湿度达到或接近 100%, 而霾虽然与雾滴相似都是由吸湿性气溶胶粒子组成, 但它是在大气湿度小于 80% 的情况下生成或存在的, 相对湿度介于 80%~95% 的。霾和雾可以共存形成雾霾混合物(吴兑等, 2009), 因而相对湿度一般被认为是区分雾与霾的一个主要大气参数。在 80%~95% 是一个过渡区, 为雾滴与霾粒子共存的。因而在这个区间, 无论从观测上或理论上, 要确定雾与霾的确切比例是有困难的。吴兑(2006)认为在这个过渡区间, 其主要成分是霾, 本文的结果支持这个看法。但由于这个问题是涉及雾与霾转换的重要问题, 值得进一步研究。在大气中, 微细的霾粒子以多种方式存在, 只有当相对湿度接近饱和时, 霾粒子才能吸湿转化成更

大的雾滴, 但接近饱和的大气湿度条件($\geq 95\%$)并不经常出现, 只有某些特定天气形势下才会发生。另一方面, 一旦雾滴形成, 要想继续存在而不被蒸发掉, 也需要一定的天气形势维持大气的饱和条件。否则, 一旦相对湿度降低, 甚至低于 80%, 雾滴则可蒸发而转化成霾滴。图 11 为雾日和霾日天气条件下全国年平均相对湿度的时间演变。由图可见, 霾日的相对湿度平均在 69%, 在 1990 年之前相对湿度呈现逐渐增加的趋势, 1990 年以后则不断减小, 至今降低到 68% 左右, 这种趋势变化与中国地区近 50 年平均相对湿度的变化有相似之处, 这主要是由于 2 个原因: (1) 中国地区平均地表温度从 20 世纪 60 年代以后不断上升, 因而饱和比湿不断增加; (2) 中国大部分地区的实际比湿是减少的, 因而相对湿度(实际比湿与饱和比湿之比)大部分是减少, 其中东部地区的贡献最大(图略), 尤其是 1990 年的下降趋势与东北、华北、长江流域近地面相对湿度的下降十分一致(Song 等, 2012), 华南的相对湿度下降出现在 2002 年之后, 这表明近 20 年由于中国东部近地面大气相对湿度降低(大气变干), 霾日具有较低的相对湿度, 达不到一般定义的 80% 的阈值。由于霾日的相对湿度偏低, 如果没有更多的水汽输入以使大气饱和, 霾滴将更难向

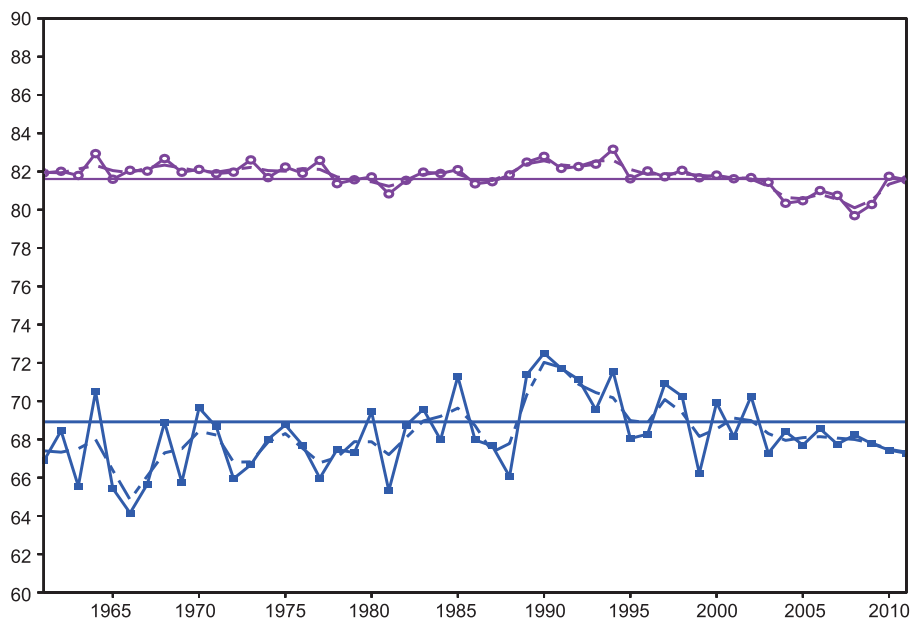


图 11 1961~2011 年雾日和霾日全国平均相对湿度的时间演变曲线

实心方框表示霾天, 空心圆表示雾天。粗实线为 1981~2010 年气候平均; 虚线表示 9 点平滑曲线。单位: %

雾滴转化, 这可能是导致雾日减少的一个重要原因. 相对湿度的减小一方面是由于近地面气温增加, 并使饱和比湿相应增大的结果. 另一方面, 如果一个地区水汽输入不能使大气实际水汽增加, 则相对湿度必然下降, 这意味着中国的气候变暖将使霾向雾转换变得更不容易, 其结果是霾日将可能持续更长时间或更易发生.

雾日的相对湿度整体也偏低, 平均在 82% 左右. 这在很大程度上可能是由于观测资料的时间分辨率造成的. 本文是根据日平均值(即雾日)得到的, 而不是雾生成时刻或时段的大气参数值, 这会把雾减弱和消散时段的参数值也平均在内, 从而降低雾日形成的相对湿度值. 为此, 我们进一步从所有雾日中挑选出相对湿度在 95% 以上的雾日进行计算和统计(图 12), 可以看到其平均值大约为 96.3%, 这是一个接近饱和的值, 与过去定义的相对湿度阈值(95%)是一致的(图 12(a)). 但由图 12(b)可以看到达到相对湿度达到 95% 以上的雾日平均只占总雾日的 15% 左右, 这表明相对湿度在 95% 以上的取样样本只占整个雾日的 1/7~1/6, 这意味着雾在 95% 相对湿度条件下生成的样本明显减少, 也可能是大部分雾日的取样时间都不在雾的生成与维持时段. 如果后者的情况是对的, 则表明由于地面大气观测的限制, 在研究某一天天气现象或事件的气候变化时, 其取样和平均方式会明显影响所得到的结果. 为尽可能减少其不确定性, 利用连续观测的地面自动气象站记录进行对比和校正是一个可能的途径, 但也不能排除雾日形成的相对湿度阈值(95%)的降低.

根据最近关于地面大气湿度的研究(Simmons 等, 2009), 最近约 10 年期间(1999~2008 年, 研究未包括

最近 5 年), 多种再分析和观测资料表明, 中低纬地区大气相对湿度是减少的, 尤其是在陆地地区. 其减少原因是由于来自海洋的水汽供应(实际比湿)并没有增加, 而陆面的温度由于气候变暖, 一直在不断上升. 根据克劳修斯-克拉贝龙方程, 饱和比湿也不断增加, 这使相对湿度(实际比湿与饱和比湿之比)减少. 实际上从 2000 年开始, 海表温度不但没有上升, 在热带中东太平洋地区反而出现下降, 这明显限制或减少了海面的蒸发和流向陆地(如东亚)的水汽量. 由于中国的雾、霾天气主要分布在中东部地区, 而西部地区发生的频率相对要少这里以中国东部区域为例, 图 13 给出中国东部地区温度(T)、实际比湿(q)、饱和比湿(q_s)和相对湿度(RH)的长期变化曲线, 可以看到 T 和 q_s 是不断上升的, 而 q 从 1998 年前后是不断下降的, 结果相对湿度从 1998 年前后有明显下降, 实际上这种下降趋势是从 1990 年前后就已开始. 上述结果表明, 在全球变暖背景下, 中国东部地区相对湿度在不断下降(干燥化), 这种气候背景条件的变化可能影响整个雾、霾日生成阈值的降低.

5 结论

通过 1961~2011 年近 50 年中国地区雾与霾及能见度气象台站观测资料分析, 得到以下主要结论.

(1) 中国地区雾发生的频率呈先增后减的变化, 尤其是 1990 年以后雾日明显减少, 这与气候变暖引起的近地面相对湿度的减小趋势一致, 但轻雾呈上升趋势. 霾日发生的频率总体上呈增加趋势, 霾日以冬季最多, 秋季和春季次之, 夏季发生最少.

(2) 在中国东部四个分区中, 华南霾日出现最多,

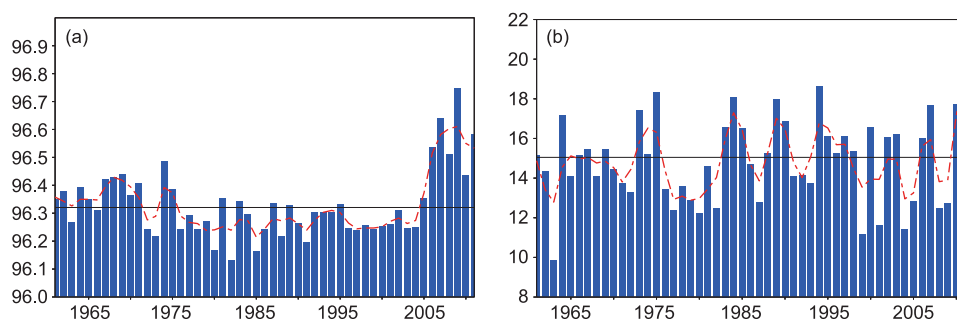


图 12 1961~2011 年相对湿度 $\geq 95\%$ 年雾日的平均相对湿度的时间演变(a)以及年雾日与年总雾日之比的时间演变(b)

黑色粗实线为 1981~2010 年气候平均; 红色曲线为 9 点平滑. 单位: %

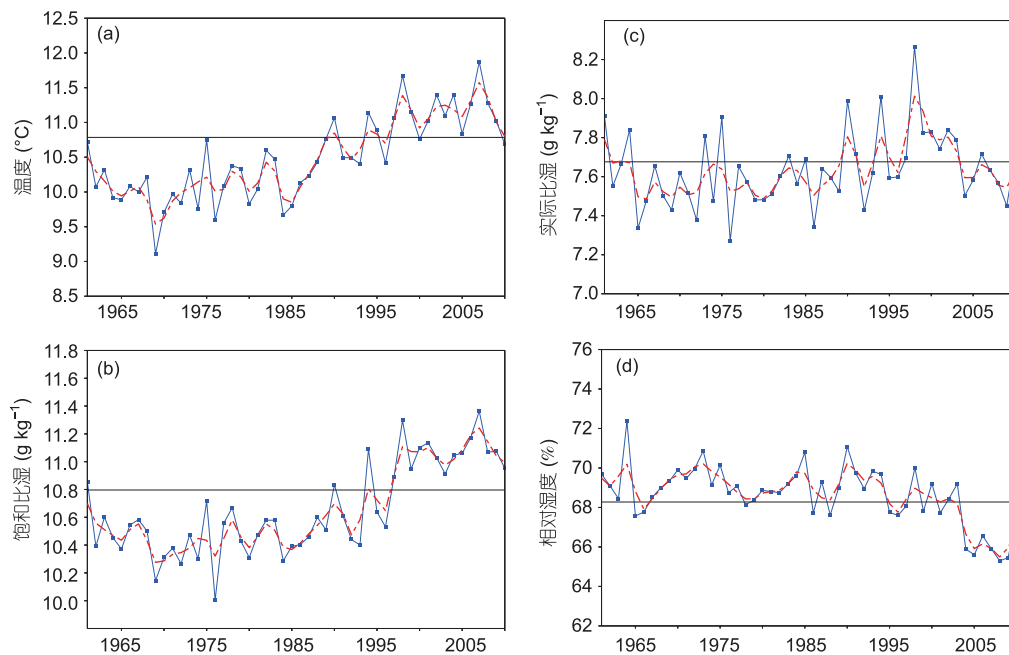


图 13 1961~2010 年中国东部区域年平均温度(a)、饱和比湿(b)、实际比湿(c)和相对湿度(d)的时间演变

近 20 年平均为 22 天; 江淮地区次之, 平均为 18 d; 华北平均为 12 d; 东北最少平均不到 1 d. 东北从 1980 年以后霾日不断减少, 华北从 20 世纪 80 年代后期总体上也呈减少趋势, 但 2005 年以后又呈上升趋势. 江淮和华南地区都呈不断增加趋势, 只是近年来华南才出现减少趋势. 而各区的雾日从 1980 年开始先后都出现了减少趋势, 尤其是 1990 年以后减少明显.

(3) 雾日和霾日各具有不同的能见度水平, 雾日低, 而霾日较高, 并且不论是所有霾日还是严重霾日, 其能见度在近 50 年中都是连续下降的, 全国平均能见度距离大致下降了一半左右.

(4) 对于严重雾日和霾日其在总雾日和霾日中

所占的比例在 1990 年之前一直是呈线性增加的趋势, 以后浓雾和重雾日转为缓升, 而严重霾日转为减少.

(5) 本文得到的雾日和霾日的平均相对湿度分别为 69% 和 82%, 这些值比过去一般认为的相对湿度值要低 10%~11% 左右. 对于霾日偏低的相对湿度值可能与气候变暖引起的气候背景值降低密切相关. 自 1990 年, 中国东部地区相对湿度平均降低了 6%~8%. 雾日的平均相对湿度偏低, 可能主要是由观测资料的取样次数不足和日平均造成, 但也不排除近 30 年相对湿度出现降低趋势的影响. 本文的分析表明相对湿度大于 95% 的雾日取样只占整个雾日的 15%, 这种不确定性需要用更高分辨率的观测资料进行分析加以改进.

参考文献

- 第二次气候变化国家评估报告编委会. 2011. 第二次气候变化国家评估报告. 第四章, 现代极端气候事件变化. 北京: 科学出版社. 711
- 丁一汇, 李巧萍, 柳艳菊, 等. 2009. 空气污染与气候变化. 气象, 35: 3-15
- 高歌. 2008. 1961~2005 年中国霾日气候特征及变化分析. 地理学报, 63: 762-768
- 胡亚旦, 周自江. 2009. 中国霾天气的气候特征分析. 气象, 35: 83-78
- 刘小宁, 张洪政, 李庆祥, 等. 2005. 我国大雾的气候特征及变化初步解释. 应用气象学报, 16: 220-230
- 孙戡, 马振峰, 牛涛, 等. 2013. 最近 40 年中国雾日数和霾日数的气候特征. 气候与环境研究, 18: 307-406
- 王丽萍, 陈少勇, 董安祥. 2006. 气候变化对中国大雾的影响. 地理学报, 15: 528-536
- 吴兑. 2006. 再论都市雾与霾的区别. 气象, 32: 9-15

- 吴兑, 吴晓京, 朱小祥. 2009. 雾和霾. 北京: 气象出版社. 198
- 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, 27: 146–151
- 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: 46–55
- 张小曳, 周凌晔, 丁国安. 2009. 大气成分与环境气象灾害. 北京: 气象出版社. 142
- Ding Y H, Sun Y, Wang Z Y. 2008. Inter-decadal variation of summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences. *Int J Climatol*, 28: 1139–1161
- Doyle M, Dorling S. 2001. 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
- Simmons A J, Willet K M, Jones P D, et al. 2009. Low-frequency variations in surface atmospheric humidity, temperature, and precipitation: Inference from reanalysis and monthly gridded observational data sets. *J Geophys Res*, 115: D01110, doi: 10.1029/2009JD012442
- Song Y F, Liu Y J, Ding Y H. 2012. A study of surface humidity change in China during the recent 50 years. *Acta Meteor Sin*, 26: 541–553