

孙戔, 马振峰, 牛涛, 等. 2013. 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, 18 (3): 397–406, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12170. Sun Yu, Ma Zhenfeng, Niu Tao, et al. 2013. Characteristics of climate change with respect to fog days and haze days in China in the past 40 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (3): 397–406.

最近 40 年中国雾日数和霾日数的气候变化特征

孙戔¹ 马振峰² 牛涛³ 付如友⁴ 胡俊峰⁵

¹ 成都信息工程学院, 成都 610103

² 四川省气候中心, 成都 610072

³ 中国气象科学研究院, 北京 100081

⁴ 四川省茂县气象局, 茂县 623200

⁵ 西南空管局气象中心, 成都 610072

摘 要 根据 1971~2010 年 567 个中国地面观测站点的雾日数和霾日数资料, 分析了我国雾日数和霾日数的空间分布、季节变化以及年代际变化特征, 并且利用 REOF (旋转经验函数正交) 分解对雾日数进行气候区划。结果表明: (1) 雾主要分布在东南沿海地区、四川盆地地区、湘黔交界、山东沿海以及云南南部等地区。霾主要集中于华北、河南以及珠三角和长三角地区。(2) 在季节变化上: 秋、冬季雾和霾的分布大于春夏。(3) 雾日数和霾日数年代际变化明显, 雾日数在 20 世纪 70 至 90 年代较多, 20 世纪 90 年代以后减少; 霾日数自 2001 年以来急剧增长。(4) 雾日数可以共可分为 10 个区, 其中华北区、川渝区以及长江中下游区是雾出现频率较高的几个重点区域。

关键词 雾日数 霾日数 时空分布 分区

文章编号 1006-9585 (2013) 03-0397-10

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12170

Characteristics of Climate Change with Respect to Fog Days and Haze Days in China in the Past 40 Years

SUN Yu¹, MA Zhenfeng², NIU Tao³, FU Ruyou⁴, and HU Junfeng⁵

¹ Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610103

² Sichuan Climate Center, Chengdu 610072

³ Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

⁴ Maoxian Meteorological Bureau of Sichuan Province, Maoxian 623200

⁵ Meteorological Center of Southwest Air Traffic Management Bureau, Chengdu 610072

Abstract Using observed fog and haze data from 567 stations during 1971–2010 in China, the general distribution and the seasonal and decadal variations of fog days and haze days were demonstrated. A rotated empirical orthogonal function was used to classify the fog days in China according to climate. The results show that: (1) Fog days were distributed mainly over the southeastern coastal area, the Sichuan Basin, the border between Hunan and Guizhou, the Shandong coastal area, and southern Yunnan. Haze days were concentrated over North China, Henan, the Pearl River Delta, and the Yangtze River Delta area. (2) Seasonal variations appeared: The numbers of fog days and haze days in autumn and winter are larger than those in spring and summer. (3) Fog days and haze days in China exhibit obvious decadal variations. There are more fog days from the 1970s to the 1990s, and fewer from the 1990s to 2010. The yearly variation trend of haze days

收稿日期 2012-10-17收到, 2013-02-27收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2011CB403404, 自然科学基金 40875077, 气象公益性行业专项 GYHY201106050-02、GYHY201206011-1

作者简介 孙戔, 女, 1988 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候以及资料同化相关研究。E-mail: shirley913517@163.com

通讯作者 牛涛, E-mail: niutao2001@cma.cma.gov.cn

was ascending rapidly from 2001. (4) The entire area of China can be divided into 10 parts. The north China, Sichuan, Chongqing, and the middle and lower reaches of the Yangtze River areas are major fog regions.

Keywords Fog days, Haze days, Spatial and temporal distribution, Regionalization

1 引言

雾是指近地面空气中的水汽凝结成大量悬浮在空气中的微小水滴或者冰晶,导致水平能见度低于 1 km 的天气现象,按照水平能见度来区分又分为雾 (<1000 m)、大雾 (<500 m)、浓雾 (<200 m) 以及强浓雾 (<50 m)。判断雾日的标准为影响能见度的程度小于 1 km,颜色为乳白,相对湿度近 100%,多在日出前锋面过境前后(中国气象局,2003)。其形成过程与温度、相对湿度等气象要素密切相关(Niu et al, 2010)。而霾为远处光亮物体微带黄色、红色黑暗物体微带蓝色,气团稳定,较干燥,在一天中任何时候均可出现(中国气象局,2003)。2010 年颁布的霾观测气象行业标准中定义霾为大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中,使水平能见度小于 10.0 km 的空气普遍混浊现象。它使远处光亮物体微带黄、红色,使黑暗物体微带蓝色。霾的观测判别条件为能见度<10.0 km,排除降水、沙尘暴、扬沙、浮尘、烟幕、吹雪、雪暴等天气现象造成的视程障碍。相对湿度小于 80%,判别为霾,相对湿度在 80%~95%时,按照地面气象观测规范规定的描述成大气成分的指标进一步判别。并且明确加入了新的判据指标:PM_{2.5}(大气中粒径小于或等于 2.5 μm 的颗粒物)、PM₁(大气中粒径小于或等于 1 μm 的颗粒物)、气溶胶散射系数和气溶胶吸收系数。这样以来使得判断雾和霾天气现象更具科学性(中国气象局,2010)。

近年来,随着经济发展的加快和城市扩大化,大气气溶胶的污染日益严重。雾和霾天气不仅造成交通事故频频发生,严重危害人类的身体健康甚至影响到区域气候。所以对于研究雾和霾的气候特点意义重大。李子华等(1992)分析了西南地区 and 长江下游雾的时空分布、微物理结构和大气边界层的温湿条件,研究了辐射雾发展及消散的物理过程。李子华(2001)总结了 40 余年来中国在人工消雾、雾的物理化学特性、雾生消物理过程研究等方面的成就,介绍了雾与生态环境之间的紧密关系及雾数值模式研究的发展过程和取得的重要成果。王丽萍

等(2005)分析了全国雾的地理分布,讨论了不同区域雾的月年变化特征。刘小宁等(2005)分析了 1950~2000 年中国大雾时空分布的基本气候特征,结果表明我国大部分地区大雾日数呈减少趋势。林建等(2008)分析了 1971~2005 年间大雾的时空分布特征以及环流形势,结果表明近 35 年来,江南、华南的雾日变化不明显,其余大部分地区的雾日都呈递减趋势。国内对于霾天气的研究较晚,高歌(2008)总结了 1961~2005 年间中国霾日数气候特征及变化分析,得出全国平均年霾日数呈现明显的增加趋势,而人类活动造成的大气污染物增加及天气气候变化是长江中下游、珠江流域等地呈现增加趋势的可能原因。吴兑等(2010)研究了 1951~2005 年中国地区霾的时空分布特征,结果表明自 20 世纪 80 年代以后霾日增加明显,与经济活动密切相关。胡亚旦和周自江(2009)揭示了霾的年际和年代际的演变规律,探讨了风力条件、降水条件及季风环流的变化对霾的影响。Zhang et al. (2011)针对中国地区灰霾天气做了 REOF(旋转经验函数正交)分解的地区分型,将中国分为 9 个大区,11 个小区,其中珠三角、华北以及长三角等地为灰霾天气的高值区。近年来,也开展了雾和霾的数值模式研究工作,Liang et al. (2012)运用 WRF 模式研究了城市密度对雾的生消发展过程的影响,结果表明城市地区(尤其是自然土地)减少时将影响雾的发展。

前期的研究大多只是单一针对雾或霾某一种天气进行分析,少有将两者对比进行研究,此外,前期工作中还暂时没有对中国雾区进行气候区划。因此本文对最近 40 年(1971~2010 年)雾和霾的日数资料进行了一系列详细的统计分析。着重分析了各地区雾和霾的分布特点及其年代际变化特征,并利用 REOF 分解方法讨论了中国雾日数的地区分区。

2 资料选取及说明

本文中所用的资料为选取国家气象信息中心所提供的全国 745 个国家基准站的地面观测资料,

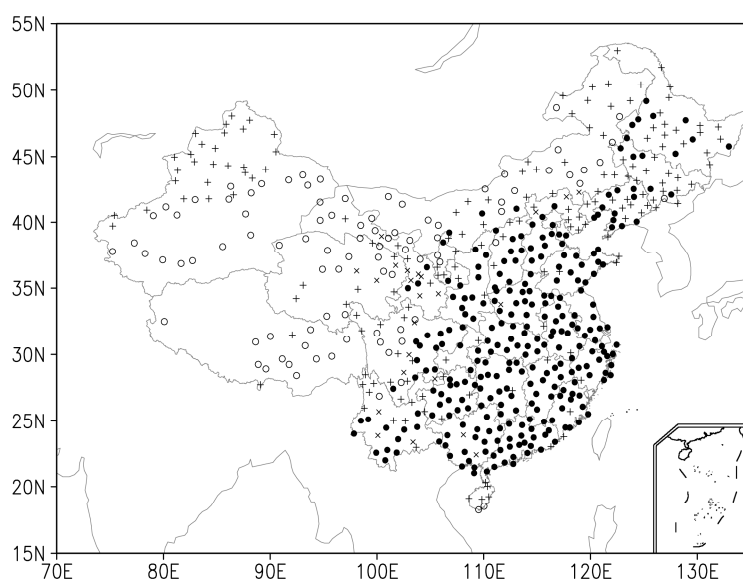


图1 全国气象测站分布图。●和+表示雾日数 EOF 及 REOF 分析时所用的 480 个站点；●和×表示霾日数 EOF 分析时所用的 320 个站点；●、+、×、○表示雾日数和霾日数气候统计分析时所用的 567 个站点

Fig.1 The distribution of meteorological stations of China. ● and + represent the stations used for EOF and REOF analysis of fog days, ● and × represent the stations used for EOF analysis of haze days, ●, +, ×, and ○ represent the 567 stations used for climatologically statistics of fog days and haze days

是我国最全面完整的地面气象要素观测资料。该资料已经通过了国家气象中心资料室的质量检验，且也有很多科研工作者将该资料运用于分析雾和霾的气候分析上（王丽萍等，2005；高歌，2008；史军等，2010；陶云等，2011）。在资料处理过程中为减少研究结果的误差，剔除了雾日数及霾日数资料时间分布不连续的站点，最终得到 567 个资料分布较为连续的站点（图 1），资料长度为 40 年（1971～2010 年）。在本文第四部分中，计算相对湿度所用的资料为相对应的 567 个地面观测站点相对湿度资料。在本文的第五部分做 EOF（经验正交函数）及 REOF 分析中，为了减少过多的 0 值对计算结果的影响，剔除了多年来雾日数和霾日数很少的站点，最终分别保留了 480 个及 320 个地面测站的数据（图 1）。另外，本研究中所用的雾日资料是指雾而不是轻雾。

3 雾日数和霾日数的空间分布特征

中国雾日数在空间上分布极不均匀，地域性明显（图 2a）。雾日数的高值区为四川盆地、湖南以及福建（40～60 d），云南西南部、重庆、长三角、陕西中部以及晋北与冀交界处（20～50 d），在这些高值区中年均雾日数在 150 d 以上的站点主要有四川峨眉山（297.83 d）、福建九仙山（292.2

d）、安徽黄山（230.32 d）以及江西庐山（189.32 d）等，这与山地的地形密切相关。另外内蒙古东北及黑龙江西北部（20～50 d）、新疆西北部则是雾日数分布的次高值区（10～20 d），但在西北地区及西藏地区雾日数分布很少，多年平均雾日数在 5 d 以下。这样的分布情况与之前的研究较为一致（王丽萍等，2005）。但是本研究（1971～2010 年）中雾日数高值中心的数值较之前的研究（1961～2000 年）略有下降（大约 10 d 左右），这与相对湿度的减少有关，在本文的第四部分有相关的分析。

霾日数的分布也是不均匀的（图 2b），且与雾日数很不相同。霾日数的高值区为广东西部、广西东北部、河南北部、陕西中部以及安徽及华北地区（25～40 d），这些高值区中年均霾日数在 80 d 以上的站点为南京（89.27 d）、河南新乡（82.51 d）、西安（80.88 d）以及山西临汾（80.27 d），这些城市都属于重工业城市，人口较为密集，城市污染严重，且煤炭工业还是临汾等城市的支柱产业，污染也不容忽视。而长三角以及云南南部（15～25 d），及福建沿海以及四川盆地（5～10 d）则是霾日数的次高值区。可见，与雾不同，霾日数的分布与城市工业化程度密切相关，重霾污染区大都是在工业城市以及高度发达的城市。该分布特点与之前的研究较为一致（高歌，2008；吴兑等，2010），但两广交界

这一高值中心的数值较之前的研究（1961~2005 年）增加，这与该地区近年来经济规模和工业化水平增加相关导致污染物排放增加相关。

4 雾日数和霾日数的季节变化

分析了中国地区雾和霾日数 40 年平均的四季变化（表 1、图 3）。春季雾日数（图略）高值区主要为福建沿海、湖南、江西以及四川盆地南部。与春季雾区分布不同，夏季雾日数（图略）高值区为黑龙江西北部及山东半岛沿岸，次高值区主要为四川盆地南部、福建、湘黔交界、山东半岛等地。秋季（图略）的雾区分布明显大于春季与夏季。除了四川盆地、福建沿海、湖南以及江西等高值区外，

华北，江南以及长三角地区等地为秋季雾日数的次高值区。冬季雾日数（图 3a）除了有与秋季相同的高值区外，还多了新疆天山以北这一高值中心，四川盆地这一高值中心强度较秋季明显加强。综上，春季雾分布最少，主要是集中于长江以南，东南沿海等地。夏季雾分布较为零散，除东北地区 and 山东半岛外，在全国绝大部分地区，夏季都是一年中雾出现最少的季节。秋冬季节中国雾分布范围较广，高值区在四川盆地、湘黔、福建以及江苏南部等地。冬季，雾高值区范围增大，除了四川盆地、重庆、湖南、江西和福建以及浙江南部这些高值区外，新疆天山以北和云南南部地区是冬季特有的高值中心。

中国霾日数分布的季节性变化相当的明显，在

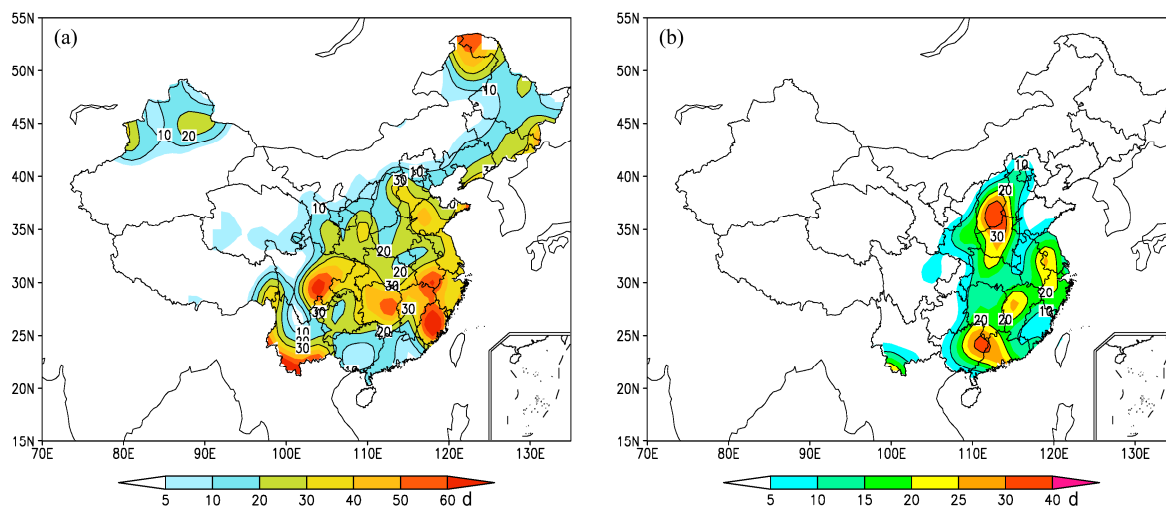


图 2 中国地区近 40 年（1971~2010 年）平均（a）雾日数、（b）霾日数的分布

Fig. 2 The distribution of annually mean (a) fog days and (b) haze days during 1971–2010 in China

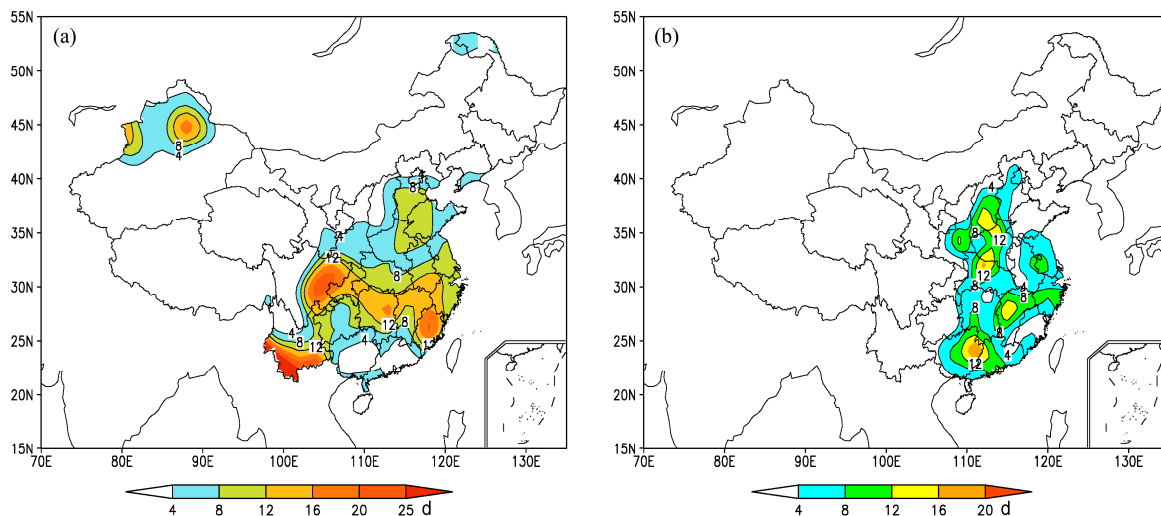


图 3 中国冬季（a）雾日数和（b）霾日数的分布

Fig. 3 The distribution of (a) fog days and (b) haze days in winter in China

一年中冬季（图 3b）的霾日数最多，春秋季节（图略）次之，而夏季（图略）的霾日数最少，这与夏季降水多，起到了很好的冲刷作用有关。中国的霾主要出现在 100°E 以东，40°N 以南地区，其中珠江三角洲、华北大部、华东以及华中等地是霾天气高发的区域。在春季，霾分布的高值中心为山西以及云南南部（9~12 d），而华北、江南以及华南部分地区是霾分布的次高值区。在夏季，霾的分布区明显减小，仅仅在山西、广东西部以及安徽和江苏交界的部分地区有少量的分布。秋季开始，霾分布的范围开始增大，高值中心在广西梧州（两广交界处）、山西临汾以及江西玉山等地，次要高值区为华南、江南和华北。冬季的霾分布达到一年四季中的峰值，高值中心除了广西梧州（两广交界处）、山西以及江西外，在河南也出现了次高值区（12~15 d），霾的分布区明显扩张，华南、华东、华北以及四川盆地东部都有一定的霾分布。由此，霾天气发生的高频区主要集中在人口较为密集的大城市以及煤炭基地，如环北京地区、山西和陕西以及河南部分地区。霾天气的季节变化相当明显，各高值中心的季节性变化也相当明显，如在春季，云南南部是霾高值中心，在其他季节却没有出现。这其中的原因有待进一步探讨。

5 雾日数和霾日数的年代际变化特征

结合 1971~2010 年 40 年平均雾日数和霾日数的年际变化（图 4）以及雾日数和霾日数年代际变化的统计（表 2），可以看出年均雾日数（图 4a）从 20 世纪 70 年代开始到 90 年代呈现出准 3~4 年的振荡变化，平均雾日数在 22 d 左右，距平日数都占 40 年平均雾日数的 14%左右。自 20 世纪 90 年代初开始，年均雾日数下降趋势明显，呈现出准 4~5 年的振荡的变化。1991~2000 年以及 2001~2010 年平均雾日数都在 17 d 左右，距平日数占到 40 年平均雾日数的 -14%左右，可见相较于前 20 年，雾日数下降的趋势明显。再对比前后 20 年的平均雾日数的变化（表 2），后 20 年平均日数较前 20 年下降了 5.7 d，距平百分率相差 28.8%。该结论与之前（王丽萍等，2005）研究得出中国地区年均雾日变化趋势大致相同，但在 1990 年左右的年均雾日数值较前人研究结果偏小 1~2 d 左右，这可能与两个研究的所用的站点及选用的资料不同有关。

表 1 雾日数和霾日数季节变化统计
Table 1 The seasonal variation of fog days and haze days

天气现象	雾日数或霾日数			
	春季	夏季	秋季	冬季
雾	高值区为福建沿海、湖南、江西以及四川盆地南部（10~20 d）	高值区为东北西部（15~25 d），次高值区为四川盆地、福建、湘黔交界、山东半岛等（5~10 d）	四川盆地、福建沿海、湖南以及江西等高值中心数值增长（10~20 d）	除了有与秋季类似的高值区外，还多了天山以北及云南南部两个中心，四川盆地高值中心强度增加
霾	高值区为山西以及云南南部（9~12 d）	仅在山西、广东西部以及安徽和江苏交界的部分地区有少量的分布（2~5 d）	高值区范围增加，两广交界处、山西临汾以及江西玉山等地（9~12 d）	高值区范围明显扩张，华南、华东、华北以及四川盆地以东基本都有霾的分布（9~18d）

表 2 雾日数和霾日数年（代）际变化统计
Table 2 The decadal variation of fog days and haze days

天气现象	年代（际）	平均日数（d）	距平日数（d）	距平占 40 年平均日数的比例
雾	1971~1980 年	22.8	3.0	15.2%
	1981~1990 年	22.6	2.8	14.1%
	1991~2000 年	17.1	-2.7	-13.6%
	2001~2010 年	16.9	-2.9	-14.6%
	1971~1990 年（偏多年代）	22.7	2.9	14.6%
	1991~2010 年（偏少年代）	17.0	-2.8	-13.6%
	1971~1980 年	5.6	-1.1	-13.8%
	1981~1990 年	5.5	-1.0	-15.4%
霾	1991~2000 年	4.8	-1.7	-26.2%
	2001~2010 年	10.2	3.7	56.9%
	1971~2000 年（偏少年代）	5.3	-1.2	-18.5%
	2001~2010 年（偏多年代）	10.2	3.6	56.9%

注：1971~2010 年平均雾日数为 19.8 d，平均霾日数为 6.5 d。

自 20 世纪 70 年代到 20 世纪末，年均霾日数（图 4b）维持在 5 d 左右，自 2001 年始剧烈增长趋势明显。年均霾日数 2007 年（14.5 d）就几乎已经达到了 1971 年（3.96 d）的 4 倍，2001~2010 年间的平均霾日数维持在 10 d 左右，几乎为 1971~2000 年 30 年平均的两倍。从表 1 可以看出，20 世纪 70 年代至 20 世纪末，平均霾日数近似为 5.3 d，2001~2010 年间的平均霾日数为 10.2 d，前 30 年以及后 10 年的距平日数分别占到 40 年平均的 -18.59%以及 55.76%。该年代际变化特征与之前研究（高歌，2008）所得出中国地区年均霾日数值及变化趋势都大致相同。综上所述，霾日数的线性增加趋势表明近年来中国地区霾天气程度增长速度很快，治理污染已经迫在眉睫。

由此，本文以 1990 年为界将时间序列分为

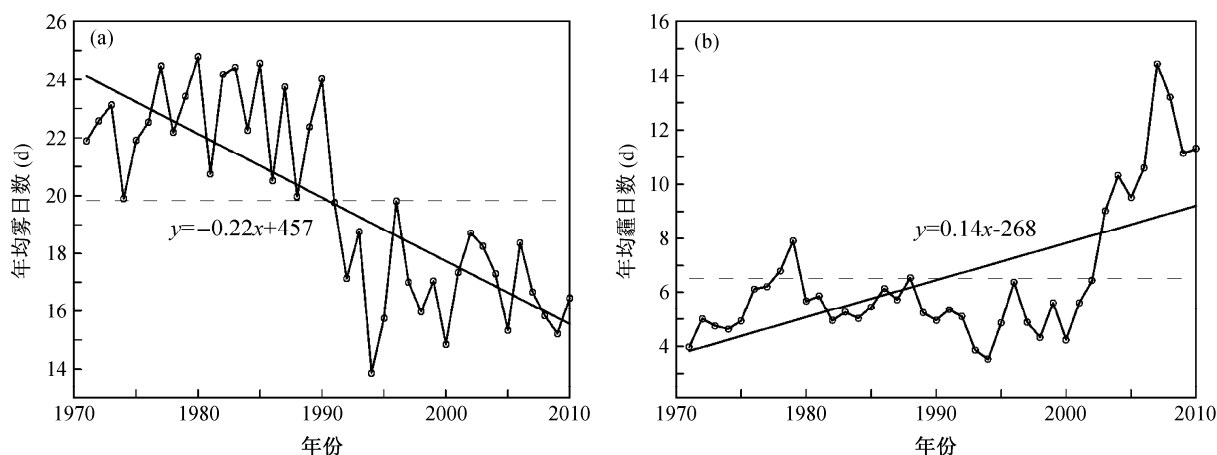


图4 1971~2010年平均中国(a)雾日数和(b)霾日数年际变化

Fig. 4 The interannual variation of yearly average (a) fog days and (b) haze days in China during 1971–2010

1971~1990年与1991~2010年两个时段,对比前20年与后20年雾日数平均分布(图略),图中高值中心以及分布范围几乎没有很大的变化,只是后20年的高值中心数值范围减少了10d左右。同样将霾日数序列划分为1971~2000年与2001~2010年两个时段,对比1971~2000年的30年平均与2001~2010年的10年平均霾日数分布(图略),霾日数前30年与后10年的高值中心不一致,前30年霾日数的高值中心主要为华北地区,而后10年却是珠三角与长三角地区,华北地区的霾日数数值并没有发生太大的变化,前30年和后10年的霾日数数值范围几乎都在25~40d之间。对于长三角地区,前30年平均霾日数为10~20d,但是后10年数值范围急剧增长到30~50d。该变化趋势在珠三角以及广西东部地区更为明显,40年间霾日数的变化区间从10~25d(1971~2000年)到了30~60d(2001~2010年)。

为进一步探究雾和霾为何有上述年代际变化特征。根据雾日数的观测标准(中国气象局,2003),雾日数和相对湿度直接相关。由于上述统计表明雾日数从1971~1990年到1991~2010年呈现出较为明显的下降趋势,因此对比了这两个时段的相对湿度的平均分布(图5)。从该图中明显看出从1971~1990年到1991~2010年相对湿度地域变化明显,尤其是在四川东南部与重庆交界地区、湘黔交界、福建以及广东广西沿海等地区更是减少趋势更为显著。相对湿度的减少明显的区域恰好与雾日数的高值区(四川盆地、湖南以及福建)以及次高值区(东北北部、广西沿海等地)相对应,以至于前后20年雾的高值区数值明显减少。所以,相对湿

度的减少对近年来雾日数的减少有一定的影响,而之前的研究者也得较一致的结论(黄治勇等,2012)。

6 雾日数的EOF分析和REOF分区及霾日数的EOF分析

为了进一步深入的研究雾日数和霾日数的分布特点,下面利用EOF分析了中国雾日数的霾日数的时空分布特点,再利用REOF方法对雾日数作了气候分区。

首先利用North et al. (1982)提出的计算特征值误差的范围来进行显著性检验,雾日数的前9个特征值通过检验,再利用特征值对数变化曲线最终选定旋转特征向量的个数为6个。霾日数的前7个特征值通过检验。各特征向量的方差贡献率以及累积方差见表3。

表3 雾日数和霾日数各特征向量的累计方差贡献率

Table 3 The accumulated variance contribution of characteristic vectors of fog days and haze days

模态	雾日数		旋转后的顺序	霾日数	
	EOF 累积方差贡献	REOF 累积方差贡献		EOF 累积方差贡献	REOF 累积方差贡献
1	23.22%	19.54%	1	28.12%	21.56%
2	31.33%	36.72%	2	42.07%	42.95%
3	38.43%	54.33%	3	49.81%	63.19%
4	43.1%	69.39%	6	55.49%	69.39%
5	47.52%	85.11%	5	59.73%	82.17%
6	51.01%	100%	4	63.41%	100%
7	54.1%			66.58%	
8	56.96%				
9	59.57%				

6.1 雾日数的 EOF 分析及 REOF 分区

6.1.1 雾日数的 EOF 分析

图 6 为雾日数 EOF 分析之后的前 2 个特征向量。图 6a 为雾日数变化的第一特征向量。特征向量

分布上有云南南部以及福建两个高值中心，高值能达到 0.6 以上。该特征向量主体呈现正相关分布，表明了雾在中国大部地区变化的一致性，结合其对应的时间系数图（图 6b），时间系数在 1971~1990

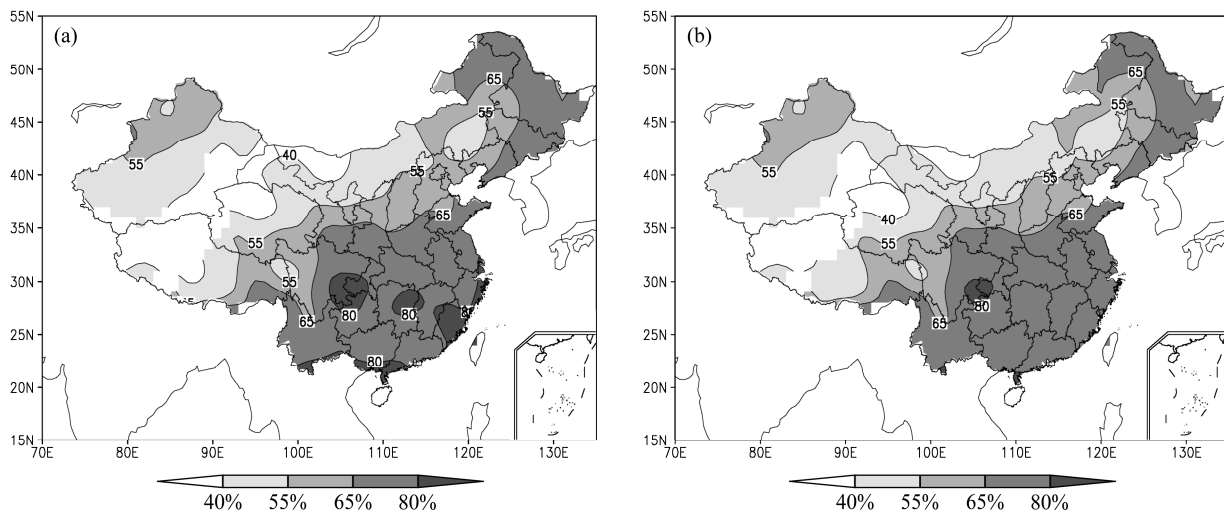


图 5 中国地区近 40 年平均相对湿度的年代际变化：(a) 1971~1990 年；(b) 1991~2010 年

Fig. 5 The interdecadal variation of mean relative humidity over China during 1971-2010: (a) 1971-1990; (b) 1991-2010

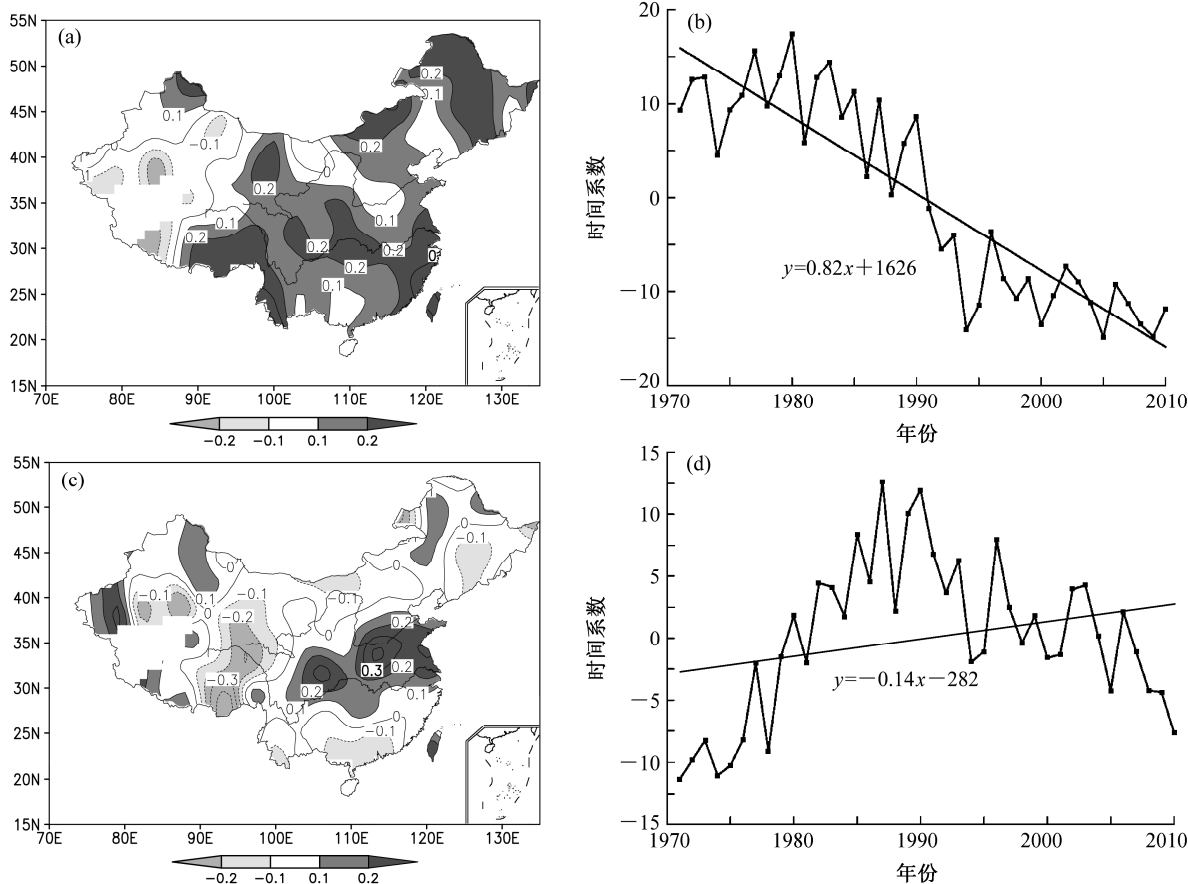


图 6 雾日数的 EOF (a、b) 第一、(c、d) 第二特征向量 (a、c) 空间分布及其 (b、d) 对应的时间系数

Fig. 6 The distribution of the (a, b) first and (c, d) second (a, c) characteristic vector of fog days EOF analysis and (b, d) the corresponding temporal variation

年为高值时段, 从 1991 年开始下降, 1994 跌至低谷, 1991~2010 年时间系数一直为负值。呈现出较为明显的前后 20 年的正负的波动变化。此特征向量时空分布特征说明中国地区雾日数的总体上呈现下降的趋势, 这与之前的气候统计特征(图 4a)是一致的。图 6c 为雾日数变化的第二特征向量, 高值区分布在四川盆地、重庆以及华中地区。高值中心分布较为集中。表现为在这些地区雾的变化具有一定的一致性。结合第二特征向量的时间序列图(图 6d)可知, 1971~1985 年为时间系数上升阶段, 1985~1995 年时间系数达到峰值, 自 1996 年开始, 时间系数下降趋势明显, 而近年来该特征向量的分布特征处于下降的趋势。雾日数变化的第三特征向量(图略), 总体上表现为华北和华东沿海及湖南贵州等地的反相关分布。华北地区为负值区。该型的时间系数(图略)表明华北地区 1980 年前后为雾出现最少的时段, 1990 年前后为雾出现最多的时段, 近年来华北地区雾日数为下降趋势, 而华东沿海及湖南贵州等地则为相反变化趋势。

6.1.2 雾日数 REOF 气候分区

应用 REOF 分析方法将全国雾日数分为 10 个大区, 16 个小区, 图 7 为 REOF 气候分区结果。各区分别为: I 区, 中国的北部和东北地区, 主要覆盖了黑龙江省以及辽宁省和内蒙古部分地区, 命名

为北部(North China)区; II 区, 主要为华北平原地区, 该区域包括了北京、天津、河北省、山西省以及河南、山东和内蒙古部分地区, 为雾日数的高值区, 代表站点为泰山, 命名为华北(HBP)区; III 区, 主要是四川盆地与重庆, 该区域也是雾日数的高值区, 代表站点为峨眉山, 此区命名为川渝(SCP)区; IV 区, 主要是在中国东部地区, 该区域包括了湖南湖北以及江西等省, 代表站点为庐山和黄山, 命名为长江中下游(Middle and Lower reaches of the Changjiang River, 简称为 MLCR)区; V 区, 为长三角、山东半岛以及辽东半岛, 命名为东部沿海(East Coast)区; VI 区, 在中国的南部, 主要是云南南部与珠江三角洲, 其中珠江三角洲为雾日数的高值区, 代表站点为九仙山, 命名为南部(South China)区; VII 区, 北疆(North of Xinjiang)区, 命名为 NX 区; VIII 区, 新疆南部沙漠地区与青海西部地区, 命名为沙漠(Desert)区。IX 区, 为甘肃中南地区(Middle south of Gansu), 命名为 SG 区; X 区, 为西藏地区, 命名为 Tibet 区。

6.2 霾日数的 EOF 分析

图 8a 为霾日数 EOF 分析后的第一特征向量的空间分布, 图 8b 为对应的时间系数。霾日数分布的第一个特征向量, 东北与珠三角地区和长三角地区特征向量高值区反位相, 表明这些区域近 40 年

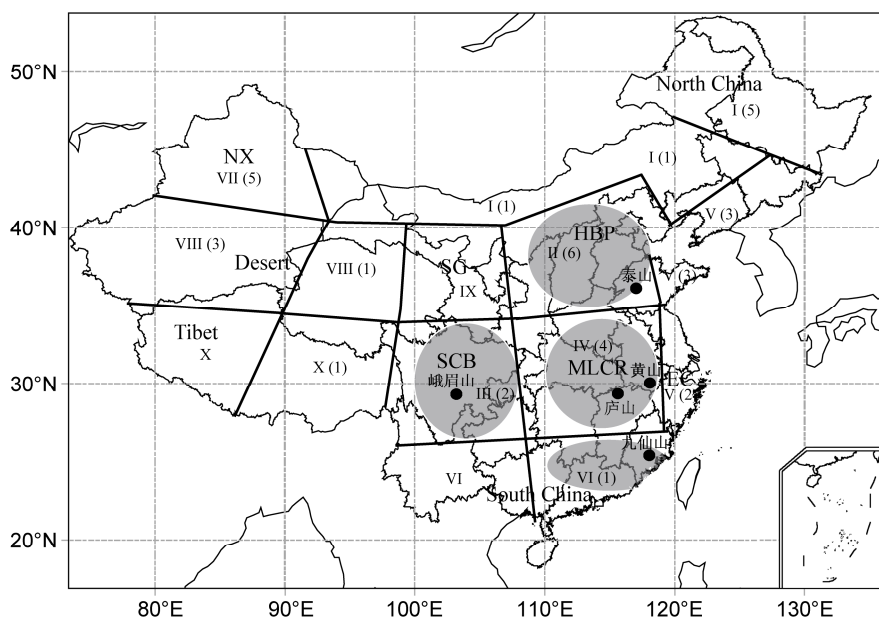


图 7 中国雾日数的 REOF 气候分区。罗马数字表示分区的编号, 括号中的阿拉伯数字表示 REOF 算法的第几特征向量(如 1 表示第一特征向量); 阴影区为雾出现的重点区; ●为高值区代表站

Fig. 7 The result of REOF analysis of fog days. Roman numerals represent the numbers of the areas; arabic numerals represent the characteristic vectors; shaded areas represent significant fog areas; ● represents representative stations

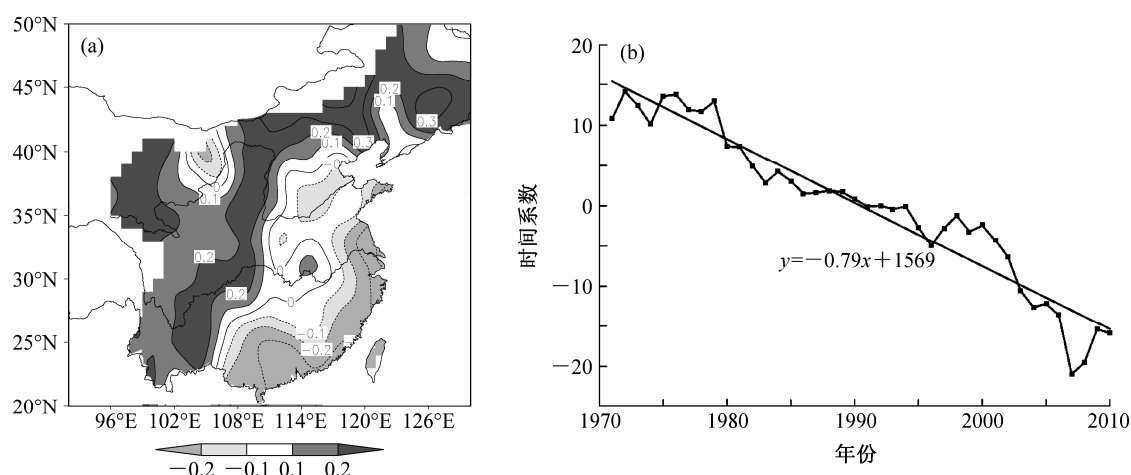


图 8 霾日数的 EOF 第一特征向量 (a) 空间分布及其 (b) 时间系数

Fig. 8 (a) The first EOF characteristic vector of fog days and (b) the corresponding temporal variation

来变化剧烈且呈相反变化趋势。该特征向量时间系数呈现出较为明显的直线下降的趋势。时间系数的变化表明近 40 年东北地区的霾日数减少，长三角与珠三角地区霾日数增加剧烈，该变化趋势与之前的研究（高歌，2008）较为一致，其结论提到霾日在我国东部大部地区主要呈现增加趋势，尤其如长江中下游、珠江流域及河南西部等地，霾日增加趋势显著。这也正好与长珠三角的霾日数变化趋势一致。第二特征向量（图略）的分布表现为中国大致地区呈现较为一致的负相关分布，尤其在东北南部等地为负特征向量高值区，结合对应的时间系数变化曲线（图略），在 20 世纪 70 年代为负值区，自 20 世纪 80 年代初开始增加，在 20 世纪 80 年代末到达正系数的峰值，一直维持到 2000 年左右。近 10 年来时间系数开始降低，于近年来到达负值的峰值。说明近年来东北南部等地霾日数增加明显，中国大部地区霾日数呈现增加的趋势。第三特征向量（图略）的正高值区主要在陕西北部。结合时间序列变化（图略），1971~1990 年时间系数为准 4~5 年的振荡，波动范围在±5 之间，自 20 世纪 90 年代初，时间系数到达正的峰值，在 21 世纪初开始降低到负的最大值。说明陕西北部地区霾日近年来有减少的趋势。

结合霾日数的年代际变化（图略）可以看出，华北地区一直是霾日数的高值区（30~40 d），而 EOF 分析的前三个特征向量中都没有出现华北地区，这是因为本文 EOF 分析是针对标准化距平日数所作的，所以华北地区而言，近 40 年来霾日数的变化不及珠三角以及广西等地明显。

Zhang et al. (2011) 的工作已完成对灰霾的气候区划，该工作利用 REOF 方法将中国分为 9 个大区，11 个小区，其中华北、珠三角地区以及长三角地区为重点霾区，因此在本文中没有再对中国地区霾日数做气候分区。

7 结论

本文基于近 40 年（1971~2010 年）我国 567 个地面观测站点的雾日数和霾日数资料，分析了雾日数和霾日数的空间分布、季节变化以及年代际变化特征，并且对雾日数进行气候区划，得出以下结论：

(1) 中国主要雾区为四川盆地、湖南、福建以及江南南部、云南西南部、重庆、长三角等地，另外内蒙古东北部及黑龙江西北部和新疆西北部则是偏季节性的雾区，而沙漠以及高原地区雾极少。霾集中的区域主要是在珠三角、广西东北部、华北、长三角以及云南南部，另外在福建沿海以及四川盆地也有一定的分布。雾的分布与地理因素相关，而霾的分布受城市工业以及污染排放影响。

(2) 雾日数有显著的季节变化，春季最少，冬季最多。四川盆地、东部沿海及华北南部皆为高值区，均在 10 d 以上。霾与雾一样，季节性变化明显。夏季霾区最小，仅仅在晋、粤西以及皖苏交界地区有少量的分布。秋季霾区分布开始增大，冬季霾区达到峰值，华南、华东、华北均为霾日数高值区。

(3) 近 40 年来雾和霾的年代际变化不同。雾日数呈现较为明显的前后 20 年波动变化，前 20 年

偏多,后 20 年偏少。而霾日数自 2001 年开始的剧烈增长。对比前 20 年与后 20 年平均雾日数分布,高值中心数值范围减少了 10 d 左右。对比前 30 年与后 10 年的霾日数分布,前者高值区在华北地区,而后者则为长三角、珠三角地区。相对湿度的减少对雾日数的减少有一定影响。

(4) 雾日数 EOF 分析第一特性向量表明雾日数总体减少,第二特性向量表明四川盆地、重庆以及长三角地区近年来雾日数减少明显,第二特性向量表明华东地区近年来雾日数增加。霾日数 EOF 分析结果第一特征向量表明近年来长三角地区霾日数增加趋势明显,第二特征向量表明东北北部和陕西北部地区霾日数为减少趋势。

(5) 雾日数可以共可分为 16 个小区,10 个大区,其中 HBP 区、SCP 区以及 MLCR 区是雾出现频率较高的几个重点区域。

8 讨论

由于历史上空气污染情况并不如近年来严重,对霾天气现象的重视程度并不如现在这样高。且天气现象是目测进行观测,所以在对雾和霾进行观测和识别时,人为误差在所难免。若能够有更好的方法及资料判断识别雾日及霾日,那将是很有意义的工作。

参考文献 (References)

- 高歌. 2008. 1961~2005 年中国霾日气候特征及变化分析 [J]. 地理学报, 63 (7): 762-768. Gao Ge. 2008. The climatic characteristics and change of haze days over China during 1961-2005 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 63 (7): 762-768.
- 黄治勇, 牛奔, 叶丽梅, 等. 2012. 长江三峡库区极端大雾天气的气候变化特征 [J]. 长江流域资源与环境, 21 (5): 646-652. Huang Zhiyong, Niu Ben, Ye Limei, et al. 2012. An analysis of climatic characteristic of extreme fog in the region around the Three Gorges Reservoir [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 21 (5): 646-652.
- 胡亚旦, 周自江. 2009. 中国霾天气的气候特征分析 [J]. 气象, 35 (7): 73-78. Hu Yadan, Zhou Zijiang. 2009. Climatic characteristics of haze in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 35 (7): 73-78.
- 李子华. 2001. 中国近 40 年来雾的变化 [J]. 气象学报, 59 (5): 616-623. Li Zihua. 2001. Studies of fog in China over the past 40 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 59 (5): 616-623.
- 李子华, 仲良喜, 俞香仁. 1992. 西南地区和长江下游雾的时空分布和物理结构 [J]. 地理学报, 47 (3): 242-251. Li Zihua, Zhong Liangxi, Yu Xiangren. 1992. The temporal-spatial distribution and physical structure of land fog in Southwest China and the Changjiang River basin [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 47 (3): 242-251.
- 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 [J]. 应用气象学报, 16 (2): 220-229. Liu Xiaoning, Zhang Hongzheng, Li Qingxiang, et al. 2005. Preliminary research on the climatic characteristics and change of fog in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16 (2): 220-229.
- 林建, 杨贵名, 毛冬艳. 2008. 我国大雾的时空分布特征及其发生的环流形势 [J]. 气候与环境研究, 13 (2): 171-181. Lin Jian, Yan Guiming, Mao Dongyan. 2008. Spatial and temporal characteristics of fog in China and associated circulation patterns [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (2): 171-181.
- Liang Zhao ming, Gao Shouting, Sun Jisong. 2012. A numerical study of the urban intensity effect on fog evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 5 (3): 240-245.
- Niu S J, Lu C S, Yu H Y, et al. 2010. Fog research in China: An overview [J]. Adv. Atmos. Sci., 27 (3): 639-662.
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function [J]. Monthly Weather Review, 110 (7): 699-706.
- 史军, 崔林丽, 贺千山, 等. 2010. 华东雾和霾日数的变化特征及成因分析 [J]. 地理学报, 65 (5): 533-541. Shi Jun, Cui Linli, He Qianshan, et al. 2010. The changes and causes of fog and haze days in eastern China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 65 (5): 533-541.
- 陶云, 段旭, 段长春, 等. 2011. 云南近 50 a 雾的变化特征 [J]. 云南大学学报(自然科学版), 33 (3): 308-316. Tao Yun, Duan Xu, Duan Changchun, et al. 2011. The change characteristics of fog in Yunnan during the nearly 50 years [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences) (in Chinese), 33 (3): 308-316.
- 王丽萍, 陈少勇, 董安祥. 2005. 中国雾区的分布及其季节变化 [J]. 地理学报, 60 (4): 689-697. Wang Liping, Chen Shaoyong, Dong Anxiang. 2005. The distribution and seasonal variations of fog in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 60 (4): 689-697.
- 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 2010. 1951~2005 年中国大陆霾的时空变化 [J]. 气象学报, 68 (5): 680-688. Wu Dui, Wu Xiaojing, Li Fei, et al. 2010. Spatial and temporal variation of haze during 1951-2005 in Chinese mainland [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 68 (5): 680-688.
- Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. 2011. Atmospheric aerosol compositions in China: Spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 11: 26571-26615.
- 中国气象局. 2003. 地面气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社, 8pp. China Meteorological Administration. 2003. Standard of the Surface Observation about Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 9pp.
- 中国气象局. 2010. 霾的观测和预报等级 [S]. 北京: 气象出版社, 8pp. China Meteorological Administration. 2010. Observation and Forecasting Levels of Haze (in Chinese) [S]. Beijing: China Meteorological Press, 9pp.