

1951—2005 年中国大陆霾的时空变化^{*1}

吴 兑^{1,2} 吴晓京³ 李 菲¹ 谭浩波¹ 陈 静²
曹治强³ 孙 弦² 陈欢欢² 李海燕¹
WU Dui^{1,2} WU Xiaojing³ LI Fei¹ TAN Haobo¹ CHEN Jing²
CAO Zhiqiang³ SUN Xian² CHEN Huanhuan² LI Haiyan¹

1. 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州, 510080
2. 中山大学环境科学与工程学院大气科学系, 广州, 510275
3. 国家卫星气象中心, 北京, 100081

1. *Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080, China*

2. *Department of Atmospheric Science, School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China*

3. *National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China*

2008-05-16 收稿, 2009-04-07 改回.

Wu Dui, Wu Xiaojing, Li Fei, Tan Haobo, Chen Jing, Cao Zhiqiang, Sun Xian, Chen Huanhuan, Li Haiyan. 2010. Temporal and spatial variation of haze during 1951—2005 in Chinese mainland. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(5): 680-688

Abstract Haze is an important indicator of air quality and, on the other hand, fog has definite meaning indicative of weather. With the rapid expansion of economic scale and acceleration of urbanization, hazy weather is getting more and more serious in cities across Chinese mainland. Long-term trends and variation of haze have been obtained by studying meteorological data from 743 surface weather stations in Chinese mainland for the period between 1951 and 2005. In terms of geographical distribution, hazy days were relatively few across the nation from 1956 to 1980 with the exception in the Sichuan Basin and the southern Xinjiang where haze exceeds 50 days per year. The number of haze days increased dramatically since 1980s, and surpass 100 days over most of the eastern part of Chinese mainland and more than 150 days in metropolitan areas at the end of last century, indicating strong linkage between haze days and economic activities. The top 10 cities with the most haze days are as follows, Shenyang, Xingtai, Chongqing, Benxi, Xi'an, Chengdu, Suining, Laohekou, Hetian, Qiemo, Minfeng, and Neijiang. Most of these cities are located in central Liaoning, the Sichuan Basin, the North China Plain, the Guanzhong Plain and the southern part of Xinjiang where is less affected by the sand storm. On the national scale, haze weather is more frequently observed in December and January than the other months, which account for 30% of the annual hazy days. September is the month with the least number of haze days, only contributes 5% to the annual hazy days. The weather stations that show an increasing trend of haze days are mainly located in the eastern and southern parts of the China, which are among the most developed zones in economy and industry. The weather stations in which a decreasing trend of haze days is observed are mainly located in the northeastern and northwestern China, due to the relatively laggard economy and industry. The northeastern China is one of the earlier regions to industrialize in China, but the achievements of recent years in industrial structure adjustment and environmental improvement have contributed to the gradual decreasing haze days in this region.

Key words Chinese mainland, Haze, Long-term variation

摘 要 霾的出现有重要的空气质量指示意义。而雾的记录,有明确的天气指示意义。由于经济规模的迅速扩大和城市化

* 资助课题:国家自然科学基金(U0733004、40375002、40418008、40775011),“863”课题(2006AA06A306、2006AA06A308),“973”课题(2005CB422207)。

作者简介:吴兑,主要从事大气物理学与大气环境研究。E-mail: wudui@grmc.gov.cn

进程的加快,中国大陆都市霾天气日趋严重。利用1951—2005年中国大陆743个地面气象站资料分析中国大陆霾的长期变化趋势,结果表明:霾的地理分布特点是,从1956年到1980年中国霾日都比较少,仅四川盆地和新疆南部超过50天;20世纪80年代以后中国霾日明显增加,到21世纪大陆东部大部分地区几乎都超过100天,其中大城市区域超过150天,与经济活动密切相关。霾日排在前10位的依次是沈阳、河北邢台、重庆市区、辽宁本溪、西安、成都、四川遂宁、湖北老河口、新疆和田、且末、民丰、四川内江,主要集中在辽宁中部、四川盆地、华北平原和关中平原地区,以及受沙尘暴影响较多的南疆地区。就中国大陆而言,12和1月霾天气日数明显偏多,2个月霾日数的总和达到了全年的30%;9月霾天气日数最少,约占全年的5%。具有霾日增加变化趋势的站点主要分布在中国的东部和南部,包括华北、黄淮、江淮、江南、江汉、华南以及西南地区东部,是中国东部一些经济和工业比较发达的地区。具有霾日减少变化趋势的站点主要分布在东北、内蒙古和西北地区东部。这些地方的经济和工业水平相对滞后,东北地区作为老工业基地,但近年来工业结构的调整和环境治理的改善使当地的霾日数逐渐减少。

关键词 中国大陆,霾,长期变化

中图法分类号 P467

1 引言

在全球范围内科学界、公众和政府越来越关注气候变暖引起的全球性环境问题。目前各项研究都表明全球变暖趋势明显,并且与人类活动密切相关,在20世纪的100年中,全球地面空气温度平均上升了 $0.4\text{--}0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,根据不同的气候情景假设模拟估计未来100年中,全球平均温度将上升 $1.4\text{--}5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。中国也和全球一样出现了显著变暖,20世纪中国气候变化趋势与全球变暖的总趋势基本一致。近百年来观测到的平均气温已经上升了 $0.5\text{--}0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,略高于全球平均水平(丁一汇等,2006;陈隆勋等,2004;徐影等,2002)。

在人类活动导致全球变暖的大背景下,中国城市区域霾有显著增加(Wu, et al, 2005; 吴兑等, 2006a, 2006b, 2008a),而中国的雾日数有显著的下降趋势(王丽萍等,2006),已有不少工作对中国的雾进行过研究,但多为对单次雾过程或区域、局地雾的研究(杨中秋等,1989;黄玉生等,1992;李子华等,2001;何立富等,2006;周自江等,2007;吴兑等,2007),刘小宁等(2005)利用中国1971—2000年资料,分析了中国雾的气候特征及变化。王丽萍等(2006)使用1961—2003年资料对中国雾的时空分布及气候变化对雾的影响作了分析。但还没有看到对中国大陆区域霾50年以上的长期变化趋势进行分析的工作,本文使用1951—2005年中国大陆743个气象站资料,重点对霾的长期变化趋势进行了分析。

霾和雾都是飘浮在大气中的粒子,都能使能见

度恶化形成灾害性天气,但其组成和形成过程完全不同。霾本来是一种自然现象,随着人类活动的影响,近年来霾的出现频率越来越高,而霾出现时,所见之处朦朦胧胧,能见度明显恶化,空气质量明显下降。人们形象地说“夜晚难见到星星,白天难看到太阳”。“霾”字最早出现在甲骨文中,在三千多年前的《诗经·邶风·终风》里有“终风且暴”、“终风且霾”、“终风且曀”的诗句,这里即是说大风吹起了尘土。“霾”字的古义就是尘,它还有一个通假字“𩇛”,其实比我们现在使用的“霾”字更通俗易懂。古籍《尔雅释天》对霾的解释是“风而雨土曰霾”;《说文》对霾的解释是“风雨土也”;《竹书纪年》也载有“帝辛五年雨土于亳”的记录。这里的“雨”字是动词(张德二,1982),表示“落”、“降”、“下”的意思,“雨土”就是“降尘”,所以用现代汉语来解释,大致是“刮风落土就是霾”。因而,古人的“霾”泛指了今天的“扬沙”、“尘卷风”、“沙尘暴”、“浮尘”等天气现象,当时在中原的陕西、山西、河南、河北这些现象并不少见,而这些现象都是现代天气现象“霾”的前身,另外,火山爆发、森林大火、人类活动排放的气溶胶污染也能形成“霾”。

空气中的矿物粉尘(土壤尘、沙尘、火山灰)、海盐、硫酸与硝酸微滴、硫酸盐与硝酸盐、有机碳氢化合物、黑碳等粒子能使大气混浊,视野模糊并导致能见度恶化,如果水平能见度小于10 km时,将这种非水成物组成的气溶胶系统造成的视程障碍称为霾,香港天文台和澳门地球物理暨气象局称烟霞。霾与雾的区别在于发生霾时相对湿度不大,而雾中的相对湿度是饱和的(如有大量凝结核存在时,相对

湿度不一定达到 100% 就可能出现饱和)。霾的厚度比较厚(1—3 km), 一般霾的日变化不明显。霾与雾、云不一样, 与晴空区之间没有明显的边界, 霾粒子的分布比较均匀, 因而在霾中能能见度非常均匀; 而且霾粒子的尺度比较小(0.001—10 μm), 平均直径 0.3—0.6 μm , 肉眼看不到空中飘浮的颗粒物。由尘、硫酸与硝酸微滴、硫酸盐与硝酸盐等粒子组成的霾其散射波长较长的可见光比较多, 因而霾看起来呈黄色或橙灰色。由于在城市严重空气污染地区, 霾可以频繁出现, 而且城市污染大气气溶胶中有许多黑碳粒子, 因而主要呈橙灰色(吴兑, 2005, 2006c, 2008b, 2008c)。霾天气已经成为中国东部城市群区域一种严重的灾害性天气现象。组成霾的气溶胶粒子能够散射和吸收太阳辐射(Wu, et al, 2006, 2009), 并且大气气溶胶中的大部分均可被人体呼吸道吸入, 尤其是亚微米粒子将分别沉积于上、下呼吸道与肺泡中, 诱发肺癌(Tie, et al, 2009), 因而引起科学界、公众和政府的广泛关注。

中国改革开放以来, 由于经济规模的迅速扩大和城市化进程的加快, 城市群区域和大城市的大气气溶胶污染日趋严重, 由气溶胶造成的能见度恶化事件越来越多, 原来少见的天气现象“霾”成为一种常见现象, 原来在各类词典上霾是一种非水成物造成视程障碍的自然现象, 近年来由于人类活动大气气溶胶细粒子污染日趋严重, 使得霾现象主要由人类活动所造成, 因而对环境保护具有重要意义。

2 资料处理方法

本文所用资料来源于中国气象系统地面观测网 1951—2005 年 743 个国家基本(基准)站的观测。该资料是中国最完整的地面气象要素观测资料, 资料均经过了国家气象中心气象资料室的质量检验。

对于使用长期气候资料进行霾的统计, 需要有统一的定量标准, 不能直接使用天气现象记录, 使用地面观测的天气现象资料分析霾天气非常不客观, 因为在中国气象系统的台站观测业务中, 区分霾的判据, 没有统一的辅助判别标准, 缺乏可比性, 南方往往使用相对湿度辅助判别而相对湿度又定得太低。需要说明的是, 在历史上各种版本的地面观测规范等技术文件中, 对霾的界定一直是非常清晰的,

从来没有给出过相对湿度阈值作为辅助标准。各省各站传承的所谓标准, 均没有任何法定的依据, 出自 20 世纪 50 年代初期以来历代观测员的口授, 各地(不同观测员)识别霾太任意, 所以各省各站非常混乱, 甚至在同一站, 不同观测员也不一样。直接使用这些天气现象资料进行的分析科学性不高, 因而需要使用能见度、天气现象、相对湿度来综合判断, 而且要将其他视程障碍现象剔除, 就是说要自己处理资料, 不能直接使用报表的霾日资料(吴兑, 2005, 2006c, 2008a, 2008b)。

对于长期的气候变化, 有 3 种常用的处理大量历史资料的统计方法:

第 1 种是, 首先需按照观测记录订正, 只要在 1 天中某个时次符合出现霾的标准即统计为 1 个霾日。

第 2 种是用日均值, 定义当日均能见度小于 10 km, 日均相对湿度小于 90%, 并排除降水、吹雪、雪暴、扬沙、沙尘暴、浮尘、烟幕等其他能导致低能见度事件的情况为 1 个霾日(吴兑等, 2006a)。

第 3 种是使用 14 时实测值, 用于分析的能见度小于 10 km 的资料必须同时满足以下 3 个条件, 14 时; 代码 01(露)、02(霜)、03(结冰)、04(烟幕)、05(霾)、10(轻雾)、42(雾); 相对湿度小于 90% 的记为 1 个霾日。以相对湿度 90% 为界对雾(轻雾)、霾进行划分, 当相对湿度超过 90% 时认为是雾(轻雾), 小于 90% 认为是霾。这样既可把雾(轻雾)中被误报的霾分离出来, 又可把霾中被误报的雾(轻雾)分离出去。同时, 利用天气现象代码可将降水、吹雪、雪暴、扬沙、沙尘暴、浮尘、烟幕等天气事件筛选出来。这种方法被国际上广泛地应用于讨论长期能见度变化趋势(Schichtel, et al, 2001; Doyle, et al, 2002; 范引琪等, 2005, 2008)。

本文使用日均值, 定义当日均能见度小于 10 km, 日均相对湿度小于 90%, 并排除降水、吹雪、雪暴、扬沙、沙尘暴、浮尘、烟幕等其他能导致低能见度事件的情况为 1 个霾日。

3 霾的气候特征

20 世纪 50 年代初期霾日都比较多(图 1), 可能与前期的战火和战后重建有关; 在大陆中部和新疆南部普遍超过 100 天, 而新疆南部多霾与沙尘暴有

关; 1956—1975 年霾日都比较少, 仅四川盆地、辽宁中南部和新疆南部超过 50 天; 1975 年以后霾日明显增加, 到 21 世纪大陆东部大部分地区几乎都超过 100 天, 其中大城市区域超过 150 天, 与经济活动密切相关。如辽宁中部年霾日长期超过 300 天, 新疆南部年霾日也超过 200 天, 四川盆地年霾日超过 150 天, 黑龙江中部、华北平原、关中平原、长江三角洲地区的年霾日也比较多。

在全部 743 个地面站中, 霾日排在前 10 位的依次是沈阳、邢台、重庆、本溪、西安、成都、遂宁、湖北老河口、新疆和田、且末、民丰、四川内江, 主要集中在辽宁中南部、四川盆地、华北平原和关中平原地区。此外, 河南新乡、山西临汾、黑龙江伊春、四川乐山、上海、河北保定、天津、南京、杭州的霾日也比较多。

可以看出, 20 世纪 80 年代以后霾天气主要出现在中国的东部, 从大的区域范围看, 除传统的 4 个

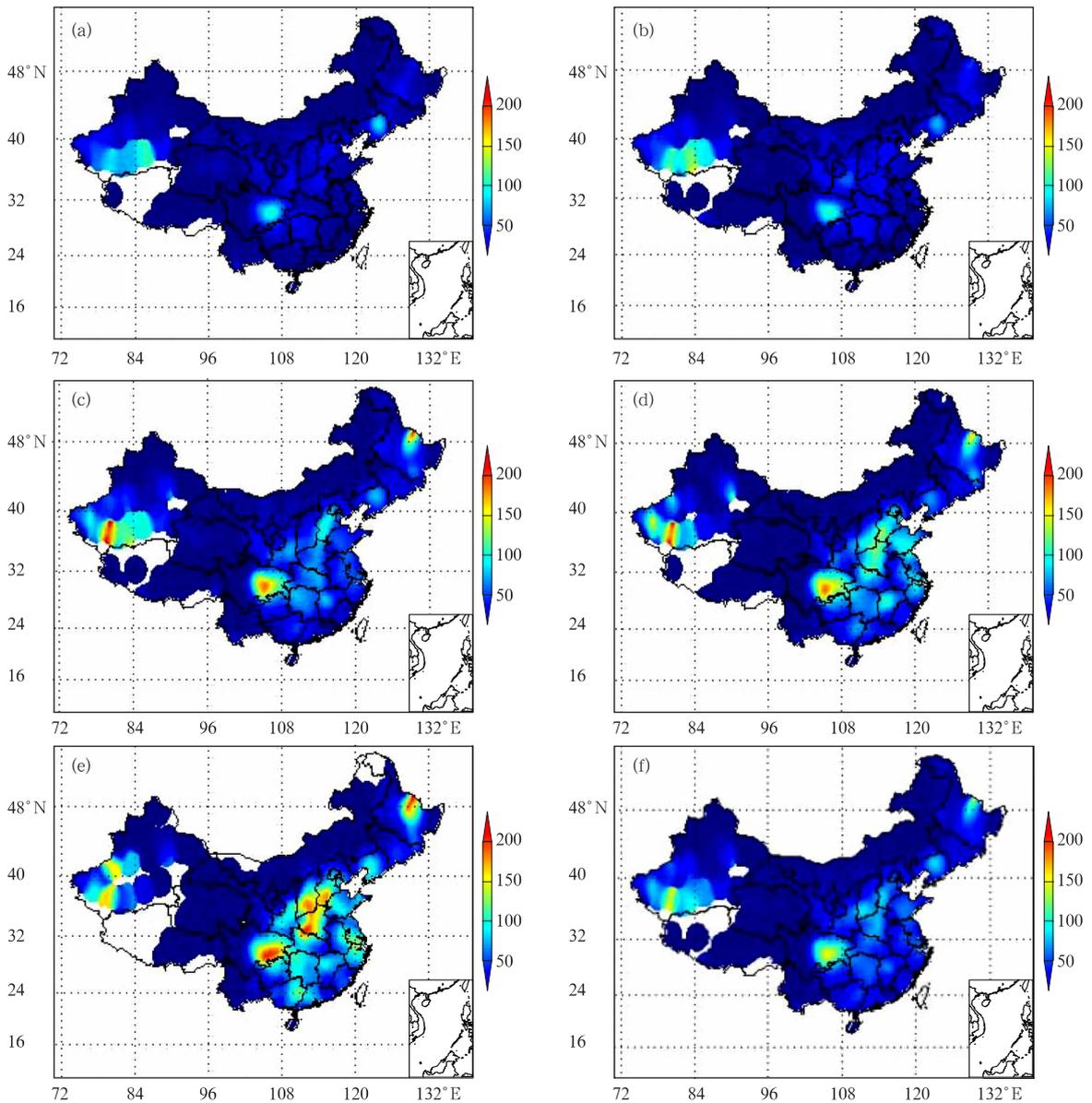


图 1 中国平均霾日分布

(a. 1956—1965 年, b. 1966—1975 年, c. 1976—1985 年, d. 1986—1995 年, e. 1996—2005 年, f. 1956—2005 年; 色标是霾日数)

Fig. 1 Distribution of the averaged yearly haze days over China over (a) 1956 - 1965, (b) 1966 - 1975, (c) 1976 - 1985, (d) 1986 - 1995, (e) 1996 - 2005, and (f) 1956 - 2005 (the number of haze days is shown with color)

明显的地区:黄淮海地区、长江河谷、四川盆地、珠江三角洲西侧外,山西南部、河南中部、河北中南部、黑龙江中部等地是霾天气的多发区。另外,一些地方如沈阳、北京、郑州、南京、杭州、上海、大连、青岛、重庆、西安、广州、香港等是明显的空气污染相对比较严重地区,霾天气出现也较频繁。相比,内蒙古和中

国的中西部偏少,年平均霾日数多在5天以下。

结合近年来卫星监测到霾的图像(图2),可以清晰地看到在华北、黄淮海平原、长江流域和珠江三角洲地区的霾层,色调暗灰,与云雾的差别明显,易于区别。

典型城市年霾日与雾日(轻雾日)长期变化

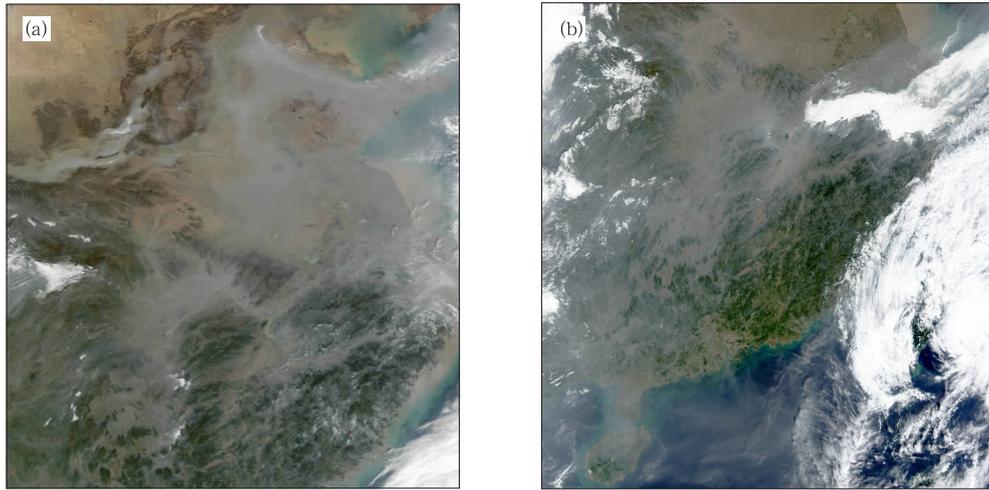


图2 TERRA 卫星监测的中国华北至江南地区(a)、华南、江南西部等地(b)霾图像
(a. 2001年3月15日MODIS探测器1 km分辨率,b. 2003年11月3日MODIS探测器500 m分辨率)

Fig. 2 Pictures of haze in (a) the regions from north China to the Jiangnan region from a satellite

(March 15, 2001, from TERRA satellite MODIS detector with the resolution of 1 km)

(图3)和典型城市月霾日长期变化(图4)可见,以沈阳为代表的辽宁中部地区是中国最早建设的重工业基地,自20世纪50年代开始至80年代末期霾日非常高(约350天),其中在60年代初期霾日减少,与当时3年历史原因导致经济活动明显减弱有关,90年代后有明显减少,与国家层面的产业结构调整与东北老工业基地改造有关,21世纪以来重新出现增加趋势应该是经济复苏的结果。北京等华北地区在50年代霾日较多,与同期沙尘天气偏多相关联,年霾日可达200天,而后逐渐减少,60年代最少每年仅20—30天,70年代后逐年增加,80—90年代基本维持在每年200天左右,21世纪以来逐渐减少到年霾日80天左右。关中平原地区50年代霾日从200天逐渐减少到50余天,而后逐年增加,到80年代中期达到高峰,每年有霾日250天左右,而后逐渐减少到年霾日50天左右。新疆南部地区的霾应该和沙尘暴、浮尘关系密切,50年代从200天逐渐减少到80余天,70年代后逐年增加,到80年代末期

达到高峰,每年霾日300天以上,而后起伏减少到年霾日60天左右。以重庆为代表的四川盆地是中国霾日比较严重的地区,50年代初期年霾日300余天,而后略有下降,年霾日维持在150天左右,60年代中期开始上升,到80年代初达到年霾日300余天,一直维持到现在。南京、杭州、长沙、广州的趋势比较接近,都是自70年代后期年霾日开始逐渐增加,到目前,南京、杭州年霾日超过250天,且变化不大,反映了长江三角洲地区的区域性特征;长沙超过150天,广州、深圳超过100天。海口的霾日一直非常少,年霾日都没有超过10天。

在各大城市中,霾主要出现在秋、冬、春季,夏季最少。而北京在夏季霾日反而比较多,集中出现在6—9月,尤其是盛夏季节的7—8月,与所谓的桑拿天同期出现,值得深入研究。

雾(轻雾)与霾相比没有明显的趋势性变化,主要反映了年际和年代际的气候波动变化。

由于霾的主要成分为微小尘粒、烟粒或盐粒的

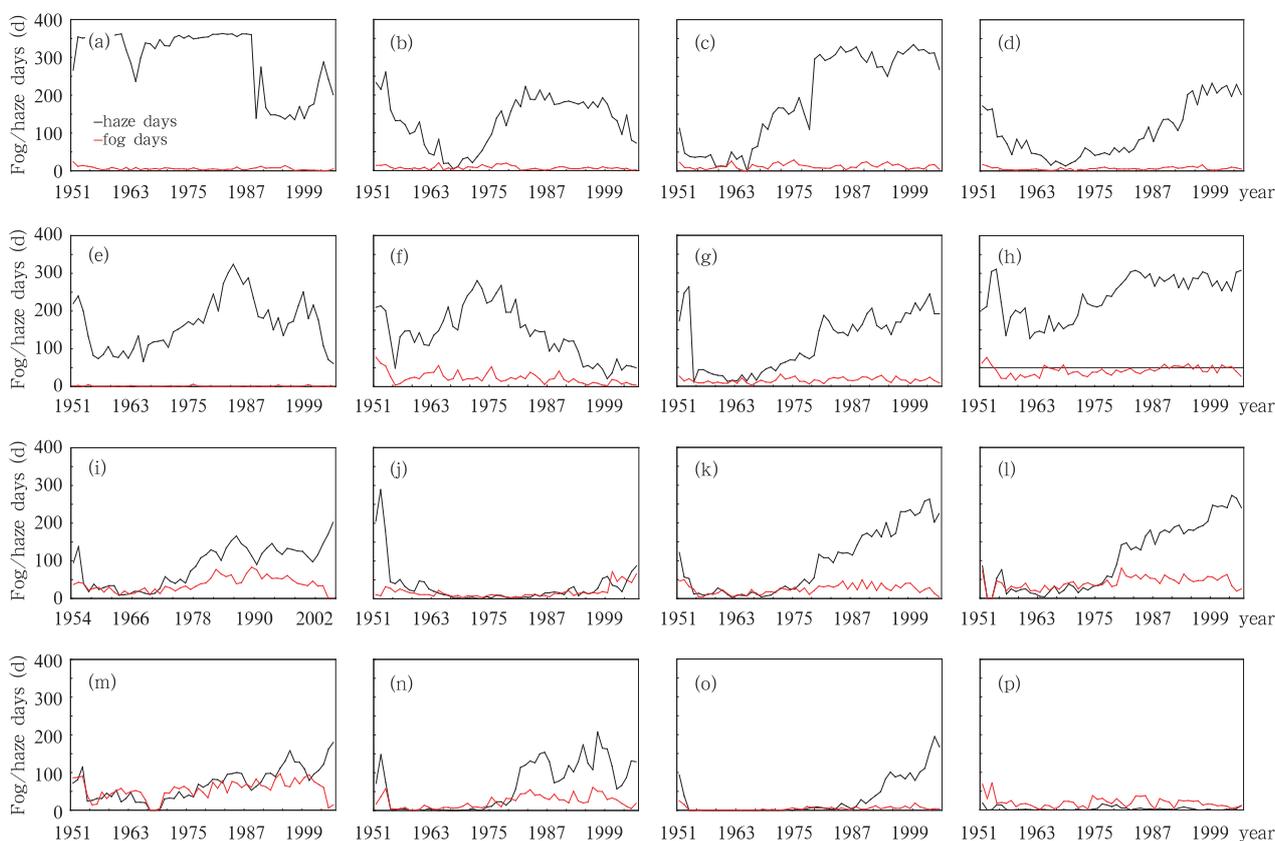


图 3 典型城市年霾日(实线)与雾日(轻雾日,虚线)长期变化

(a. 沈阳, b. 北京, c. 邢台, d. 太原, e. 和田, f. 西安, g. 郑州, h. 重庆, i. 成都, j. 贵阳, k. 南京, l. 杭州, m. 长沙, n. 广州, o. 深圳, p. 海口)

Fig. 3 Long-term variation of the annually averaged haze days and fog (mist)

days for the typical cities(The solid lines represent the haze days, the broken lines stands for fog days; a. Shengyang, b. Beijig, c. Xingtai, d. Taiyuan, e. Hetian, f. Xi'an, g. Zhengzhou, h. Chongqing, i. Chengdu, j. Guiyang, k. Nanjing, l. Hangzhou, m. Changsha, n. Guangzhou, o. Shenzhen, and p. Haikou)

集合体,无论是自然源还是人类活动源,这些粒子的来源多为下垫面的排放。在一段时期内,可以认为源排放的变化较小,但是这些颗粒物得以输送、堆积、稀释扩散的大气层结条件和天气系统背景则有着明显的季、月变化。各站点的月平均霾日数的变化特征结果表明绝大部分站点 12 和 1 月霾天气日数偏多,5—9 月偏少,具有一定的规律性。以哈尔滨、西安和杭州 3 个站点为例(图 5a、5b、5c)给出了月平均霾天气日数。对所有的站点月平均霾日数百分比进行站点平均,得到能反映所有站点的月平均霾天气的变化曲线(图 5d)。结果表明就全国而言,12 和 1 月霾天气日数明显偏多,2 个月霾日数的总

和达到了全年的 30%;9 月霾天气日数最少,仅占全年的 5%。

使用资料序列较完整的台站分析 1951—2005 年年均霾日数的变化趋势显示,趋势增加的站点有 208 个,减少的有 116 个,没有变化的有 222 个。它们的分布如图 6 和图 7 所示。可以看到,具有霾日增加变化趋势的站点主要分布在中国的东部和南部,包括华北、黄淮、江淮、江南、江汉、华南以及西南地区东部,是中国大陆东部一些经济比较发达的地区。

具有霾日减少变化趋势的站点主要分布在东北、内蒙古和西北地区东部,以及新疆中部。这些地方的经济和工业水平相对滞后,东北地区作为老工

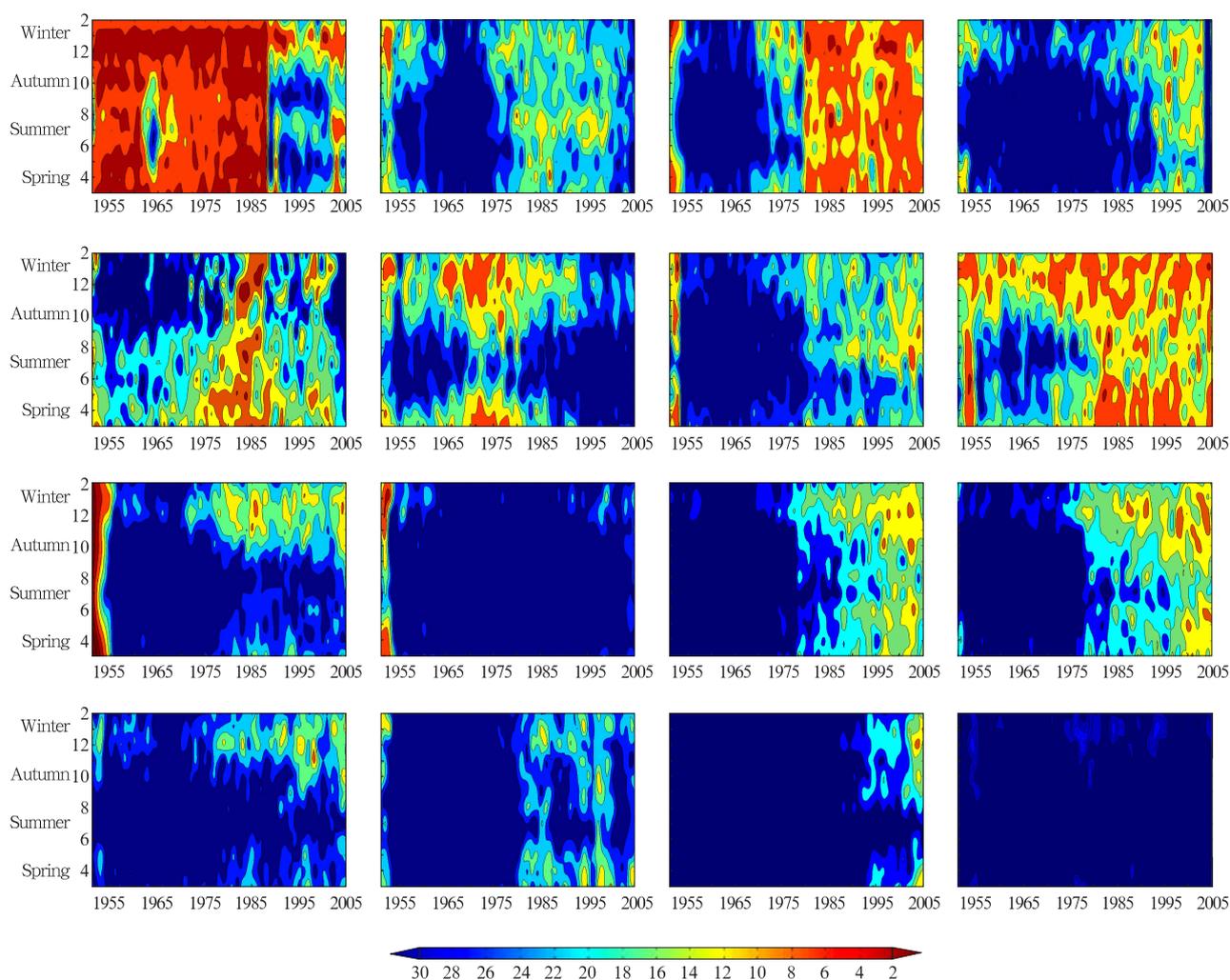


图4 1951—2005年典型城市月霾日(色标)长期变化

(a. 沈阳, b. 北京, c. 邢台, d. 太原, e. 和田, f. 西安, g. 郑州, h. 重庆,
i. 成都, j. 贵阳, k. 南京, l. 杭州, m. 长沙, n. 广州, o. 深圳, p. 海口)

Fig. 4 Long-term variation of the monthly averaged haze days for the typical cities (The haze days are shown with colour: a. Shenyang, b. Beijing, c. Xingtai, d. Taiyuan, e. Hetian, f. Xi'an, g. Zhengzhou, h. Chongqing, i. Chengdu, j. Guiyang, k. Nanjing, l. Hangzhou, m. Changsha, n. Guangzhou, o. Shenzhen, and p. Haikou)

业基地,但近年来工业结构的调整和环境治理的改善使得当地的霾日数逐渐减少。另外,还有相当一部分站点的变化趋势不明显,或者说多年霾日数基本上没有变化(图7)。仔细分析这些站点的分布,发现它们大部分分布在东北和中国的中西部地区,中国的东部和南部较少。也就是说具有正变化趋势的这些站点近似的可以代表整个中国大陆东部区域的趋势变化。而中国中西部和东北地区的年均霾日

数的整体变化特征则是呈现减少的趋势。不具有明显变化趋势的台站散布中国,主要是一些边远地区和经济相对发展缓慢的地点。

可能造成这些变化的原因主要受如下几个方面的制约:经济规模和工业化水平的发展阶段;污染物排放源的变化;气候和天气的周期性变化,影响水平输送、垂直输送,干沉降和湿沉降的各种气象控制因子;下垫面性质的改变等。

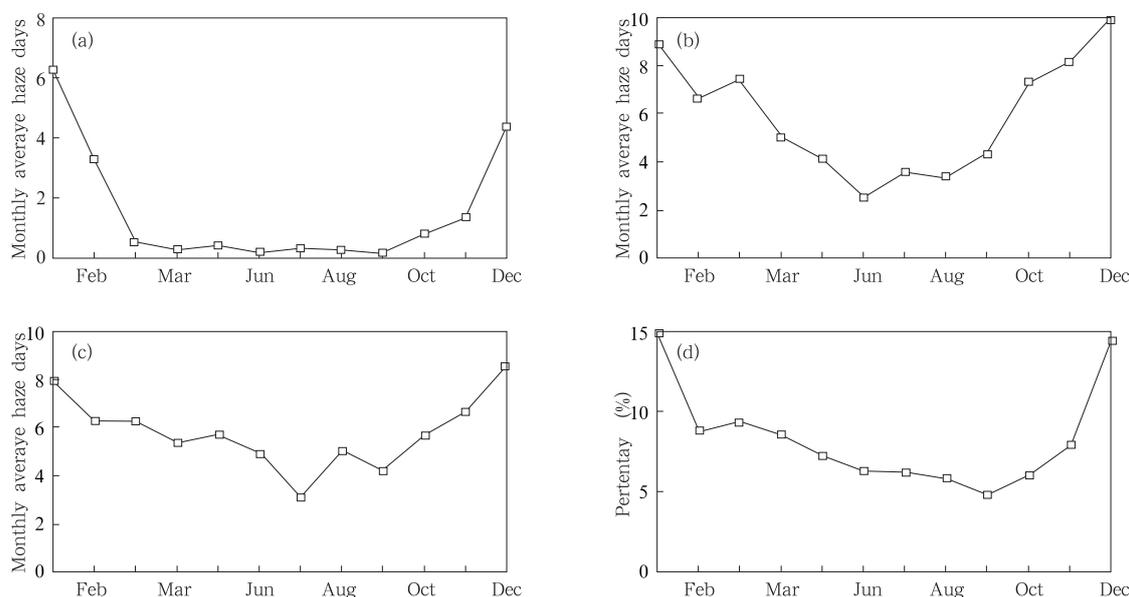


图 5 月平均霾日数分布
(a. 哈尔滨, b. 西安, c. 杭州, d. 所有站点的月平均霾日数百分比)

Fig. 5 Distribution of the monthly averaged haze days
(a. Harbin, b. Xian, c. Hangzhou, and d. the percentage of monthly averaged haze days for all the sites)

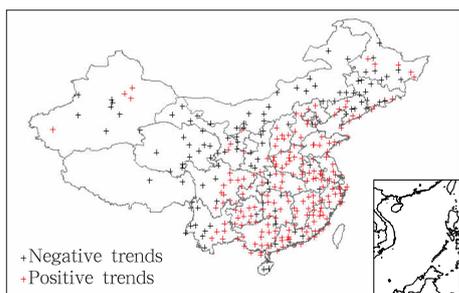


图 6 通过 t 检验的站点分布
Fig. 6 Distribution of the sites passing t -test
(black cross represents negative trends, red cross represents positive trends)

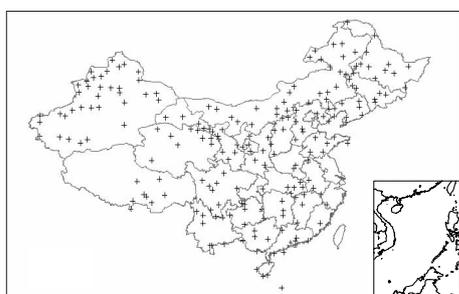


图 7 不具有明显趋势变化的站点分布
Fig. 7 Distribution of the sites without obvious variation trends

4 结 论

利用 1951—2005 年中国大陆 743 个地面气象站资料分析, 定义当日能见度小于 10 km, 日均相对湿度小于 90%, 并排除降水、吹雪、雪暴、扬沙、沙尘暴、浮尘、烟幕等其他能导致低能见度事件的情况为一个霾日的原则下, 对中国大陆霾的长期时空分布变化趋势有如下认识:

(1) 霾的地理分布特点是, 1956—1980 年中国霾日都比较少, 仅四川盆地、辽宁中南部和新疆南部超过 50 天; 80 年代以后霾日明显增加, 到 21 世纪大陆东部大部分地区都超过 100 天, 其中大城市区域超过 150 天, 与经济活动密切相关。

(2) 霾日排在前 10 位的依次是沈阳、河北邢台、重庆、辽宁本溪、西安、成都、四川遂宁、湖北老河口、新疆和田、且末、民丰、四川内江, 主要集中在辽宁中部、四川盆地、华北平原和关中平原地区, 以及受沙尘暴影响较多的南疆地区。

(3) 就中国大陆而言, 12 和 1 月霾天气日数明显偏多, 2 个月霾日数的总和达到了全年的 30%; 9 月霾天气日数最少, 约占全年的 5%。

(4) 多年年均霾日数的变化趋势显示, 趋势增加的站点有 208 个, 减少的有 116 个, 没有变化的有

222 个。具有霾日增加变化趋势的站点主要分布在中国大陆的东部和南部,包括华北、黄淮、江淮、江南、江汉、华南以及西南地区东部,是中国大陆东部一些经济比较发达的地区。

(5) 具有霾日减少变化趋势的站点主要分布在东北、内蒙古和西北地区东部。这些地方的经济和工业水平相对滞后,东北地区作为老工业基地,但近年来工业结构的调整和环境治理的改善使当地的霾日数逐渐减少。

参考文献

- 陈隆勋,周秀骥,李维亮等. 2004. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制. 气象学报, 62(5): 634-646
- 丁一汇,任国玉,石广玉等. 2006. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势. 气候变化研究进展, 2(1):3-8
- 范引琪,李二杰,范增禄. 2005. 河北省 1960-2002 年城市大气能见度的变化趋势. 大气科学, 29(4):526-545
- 范引琪,李春强. 2008. 1980-2003 年京、津、冀地区大能见度变化趋势研究. 高原气象, 27(6):1392-1400
- 何立富,李峰,李泽椿. 2006. 华北平原一次持续性大雾过程的动力和热力特征. 应用气象学报, 17(2):160-168
- 黄玉生,许文荣,李子华. 1992. 西双版纳地区冬季辐射雾的初步研究. 气象学报, 50(1):112-117
- 李子华. 2001. 中国近 40 年来雾的研究. 气象学报, 59(5):616-624
- 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(2):220-230
- 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, 61(5): 527-536
- 吴兑. 2005. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论. 气象, 31(4):1-7
- 吴兑,毕雪岩,邓雪娇等. 2006a. 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
- 吴兑,毕雪岩,邓雪娇等. 2006b. 珠江三角洲气溶胶云造成严重灰霾天气. 自然灾害学报, 15(6):77-83
- 吴兑. 2006c. 再论都市霾与雾的区别. 气象, 32(4):9-15
- 吴兑,邓雪娇,毛节泰等. 2007. 南岭大瑶山高速公路浓雾的宏微观结构与能见度研究. 气象学报, 65(3): 406-415
- 吴兑,廖国莲,邓雪娇等. 2008a. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究. 应用气象学报, 19(1): 1-9
- 吴兑. 2008b. 霾与雾的识别和资料分析处理. 环境化学, 27(3):327-330
- 吴兑. 2008c. 大城市区域霾与雾的区别和灰霾天气预警信号发布. 环境科学与技术, 31(9):1-7
- 徐影,丁一汇,赵宗慈. 2002. 近 30 年人类活动对东亚地区气候变化影响的检测与评估. 应用气象学报, 13(5):513-525
- 杨中秋,许绍祖,耿骝. 1989. 舟山地区春季海雾的形成和微物理结构. 海洋学报, 11(4):431-438
- 张德二. 1982. 历史时期“雨土”现象剖析. 科学通报, 13(5):294-297
- 周自江,朱燕君,鞠晓慧. 2007. 长江三角洲地区的浓雾事件及其气候特征. 自然科学进展, 17(1):66-71
- Doyle Martin, Stephen Dorling. 2002. Visibility trends in the UK 1950-1997. Atmos Environ, 36(19):3161-3172
- Schichtel B A, Rudolf B Husar, Stefan R Falke, et al. 2001. Haze trends over the United States, 1980-1995. Atmos Environ, 35(30):5205-5210
- Tie Xuexi, Wu Dui, Guy Brasseur. 2009. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China. Atmos Environ, 43(14):2375-2377
- Wu Dui, Tie Xuexi, Li Chengcai, et al. 2005. An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study. Atmos Environ, 39(35):6568-6577
- Wu Dui, Tie Xuexi, Deng Xuejiao. 2006. Chemical characterizations of soluble aerosols in southern China. Chemosphere, 64(5): 749-757
- Wu Dui, Mao Jietai, Deng Xuejiao, et al. 2009. Black carbon aerosols and their radiative properties in the Pearl river delta region. Sci China (Series D), 52(8):1152-1163