

石春娥, 王喜全, 李元妮, 等. 2016. 1980~2013 年安徽霾天气变化趋势及可能成因 [J]. 大气科学, 40 (2): 357–370. Shi Chune, Wang Xiquan, Li Yuanni, et al. 2016. The trend of haze in Anhui Province from 1980 to 2013 and the possible reasons [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (2): 357–370, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.14319.

## 1980~2013 年安徽霾天气变化趋势及可能成因

石春娥<sup>1,2</sup> 王喜全<sup>2</sup> 李元妮<sup>1</sup> 邓学良<sup>1</sup> 杨元建<sup>1</sup> 温华洋<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 安徽省气象科学研究所安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230031

<sup>2</sup> 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

**摘 要** 对 1980~2013 年安徽省霾日数的时空变化趋势及可能原因进行了分析, 结果表明: (1) 1980 年以来, 霾天气年均发生日数总体呈上升趋势, 年际波动较大。不同年代, 霾高发区的位置不同: 20 世纪 80 年代平均为 5.5 d, 沿江到江淮之间有零星的高发区; 20 世纪 90 年代平均为 8.5 d, 高发区在沿江中西部的望江和池州、省会合肥、淮北市部的萧县和灵璧; 2000 年代, 平均发生日数为 8.7 d, 有 3 个高发区, 分别是以合肥为中心的江淮之间中部、沿淮中部地区和沿江中东部地区。(2) 按地理位置把安徽省分为 6 个子区, 不同子区年霾日数的变化趋势不同: 皖南山区变化较平缓, 沿淮地区 2000 年后上升明显, 淮北北部和沿江有先升后降的趋势。(3) 地级市平均霾日数呈显著上升的趋势, 而县城霾日数上升速度缓慢, 且在 2008 年之后有下降趋势。(4) 城市化和汽车拥有量激增导致氮氧化物排放量快速增多, 可能是 2000 年之后地级市霾日数显著增多的主要因子, 而县城霾日数变化的驱动因子可能是气候变化原因, 如东亚季风强度的变化。

**关键词** 霾 工业化 城市化 东亚季风指数 安徽省

**稿件编号** 1006-9895(2016)02-0357-14

**中图分类号** P427.1

**文献标识码** A

**doi:**10.3878/j.issn.1006-9895.1504.14319

## The Trend of Haze in Anhui Province from 1980 to 2013 and the Possible Reasons

SHI Chune<sup>1,2</sup>, WANG Xiquan<sup>2</sup>, LI Yuanni<sup>1</sup>, DENG Xueliang<sup>1</sup>, YANG Yuanjian<sup>1</sup>,  
and WEN Huayang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Anhui Institute of Meteorological Sciences, Key Laboratory for Atmospheric Sciences and Remote Sensing of Anhui Province, Hefei 230031

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**Abstract** The spatial and yearly trends of haze during 1980–2013 in Anhui Province and its possible reasons were analyzed based on daily observations from ground-level stations. The effects of urbanization, industrialization and climate change on haze were discussed through an analysis of trends in haze frequency at urban (town) sites and comparison with provincial coal consumption, SO<sub>2</sub> emission, tropospheric NO<sub>2</sub> column content, vehicle usage and East Asia monsoon index. The main conclusions were as follows: (1) The number of annual haze days averaged over all sites increased evidently with large fluctuations. The zones with frequent haze were different in different periods. During the 1980s, the

**收稿日期** 2014-11-18; **网络预出版日期** 2015-04-27

**作者简介** 石春娥, 女, 1970 年出生, 博士, 研究员, 主要从事大气物理与大气环境研究。E-mail: shichune@sina.com

**资助项目** 公益性行业(气象)科研专项 GYHY201206011, 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室开放课题 LAPC-KF-2011-05, 安徽省自然科学基金项目 1608085MD84

**Founded by** Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest of China (Grant GYHY201206011), Special fund of the State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry (Grant LAPC-KF-2011-05), Anhui Provincial Natural Science Foundation (Grant 1608085MD84)

provincial annual average haze days was 5.5 d, with scattered high values from the zone near the Yangtze River to the Huaihe River. During the 1990s, the provincial annual average haze days was 8.5 d, with high values at some county sites and Hefei, the capital city. During the 2000s, the provincial annual average haze days was 8.7 d, with three evident high-value zones in the central area between the Yangtze River and Huaihe River, the central area along the Huaihe River, and the central to the eastern area along the Yangtze River, respectively. (2) Based on geographical locations, the province was divided into six sub-regions and the annual haze days averaged over all sites in each sub-region showed different trends. For example, it varied gently in southern Anhui, increased rapidly since 2000 in the region along the Huaihe River, and first increased and then decreased in the region north to the Huaihe River and the region along the Yangtze River. (3) Based on site locations, all sites were divided into two groups: urban sites and town sites. The number of annual haze days increased evidently at the urban sites, while it increased slowly at the town sites until 2008, and then decreased. (4) Urbanization and the rapid increase of car usage, which led to a rapid increase of  $\text{NO}_x$  emissions, might be the major impact factors involved in the evident increase of haze days at urban sites; whereas, the driving factor of variation of haze days at town sites is likely to be climate change, e.g., the intensity of the monsoon in East Asia.

**Keywords** Haze, Industrialization, Urbanization, East Asia monsoon Index, Anhui Province

## 1 引言

霾是大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中,使水平能见度低于 10 km 的空气普遍混浊现象(中国气象局, 2007)。有学者根据相对湿度将霾分为干霾和湿霾,湿霾是水汽在吸湿性气溶胶粒子上凝结而形成,水的溶解作用使得气溶胶粒径增大,能见度降得更低(杨军等, 2010)。

组成霾的颗粒物种类繁多,来源复杂。如有自然源产生的沙尘颗粒、海盐、花粉粒子;人类活动直接排放的颗粒物(汽车尾气、秸秆焚烧、工厂燃煤)和二次颗粒物(气粒转换生成的硫酸盐、硝酸盐)等(吴兑, 2013)。总之,霾是一种天气现象,自古就有,人类一直受其影响。但随着人类活动的加剧,霾已经从一种自然现象,变成一种常见的污染性天气,其原因在于人为排放不断增加。近年来,也有人将这种受到人类活动显著影响的霾称为灰霾,其本质是细粒子气溶胶污染。组成灰霾的细粒子气溶胶中二次气溶胶比例颇大,不同于由土壤、沙尘粒子等组成的自然形成的霾(吴兑, 2013)。

霾的危害很多。首先,霾天气往往伴随着严重的大气污染,对人体健康有非常不利的影响。组成霾的细粒子中可能含有大量的重金属等对人体有害的物质(Li and Shao, 2012),霾颗粒物可以吸湿增长转化为雾滴,雾滴可以溶解有毒有害物质。有观测表明南京雾天气溶胶中的多环芳烃(PAHs)等含量远高于晴天(顾凯华等, 2011),雾滴还可以是微生物生长的温床,传染病的载体。因此,霾天气可诱发呼吸道疾病等。其次,由于大量气溶胶粒子的散射和反射作用,减少到达地面的太阳辐射,

可造成小儿佝偻病高发,影响植物光合作用(王建国等, 2008; 任义芳等, 2010)。由于大量的细粒子对辐射传输的影响,霾能降低大气能见度,加剧气候变化,导致灾害性气候极端事件频发。因此,中国东部地区近年来频繁发生大范围的灰霾事件已引起大气科学工作者的广泛关注(王喜全等, 2011, 2013; 王自发等, 2014; 王跃思等, 2014; 石春娥等, 2014; 高怡和张美根, 2014; 刘瑞婷等, 2014)。这些研究在一定程度上加深了对中国东部地区霾天气形成机制的理解,但这些研究主要侧重于天气条件,如输送条件、扩散条件对典型霾污染事件的影响,而从气候背景、污染源排放等方面综合探讨不同地区、不同规模城市霾天气变化的共性与差异的研究尚不多见。

安徽省属于泛长三角地区的内陆农业大省,除了西部大别山脉和南部的黄山山脉地势较高外,其余均为海拔 15~400 m 的丘陵和平原。主要农作物,北边以小麦为主,南边以水稻、油菜为主。随着城市化、工业化进程加快,并受周边大气污染输送及农业活动(如秸秆焚烧)的影响(杨元建等, 2013),20 世纪 80 年代开始安徽省城市能见度普遍下降,霾天气迅速增多(张浩等, 2008, 2010; 石春娥等, 2014)。虽然城市霾天气频发,但由于霾的危害不及暴雨、连阴雨、雾等那么直接,目前还没列入安徽的主要灾害性天气,对安徽霾天气的相关研究也不多。仅有的研究集中在城市霾的气候特征分析及气象条件影响(张浩等, 2010),而对造成安徽霾日数变化趋势的原因未做深入分析。本研究利用安徽省 80 个地面测站水平能见度、相对湿度等资料,以及天气现象观测记录,分析 1980~

2013 年安徽省霾天气的变化趋势、不同规模城市测站霾日数变化趋势, 结合中国国家统计局发布的安徽省及周边省份  $\text{SO}_2$  排放量、燃煤量、汽车保有量等资料和 Sciamachy (SCanning Imaging Absorption SpectromMeter for Atmospheric CHartographY) 卫星监测对流层  $\text{NO}_2$  柱含量资料、NCEP (National Centers for Environmental Prediction) /NCAR (National Center for Atmospheric Research) 再分析资料等, 探讨安徽城乡霾天气变化趋势及其可能原因, 旨在为政府部门制定空气污染防治计划提供科学依据、为业务部门开展霾天气预报业务奠定基础。

## 2 资料与霾日重建方法

### 2.1 资料

所用资料包括: (1) 安徽省各地面气象观测站的逐日地面观测资料, 包括地面水平能见度、相对湿度、天气现象记录和地面风速等, 由安徽省气象信息中心提供; (2) 中国国家统计局发布的各省逐年  $\text{SO}_2$  排放量、燃煤量、汽车保有量等资料; (3) Sciamachy 卫星监测对流层  $\text{NO}_2$  柱含量资料 (Shi et al., 2008); (4) NCEP/NCAR  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料。

安徽省现有地面测站 80 个, 大部分测站始建于 20 世纪 50 年代后期, 如 1955 年有观测记录的台站仅 13 个, 1960 年增加到 70 个。很多测站在 1963~1979 年无能见度观测, 如 1975 年安徽省仅 15 个测站有能见度观测记录。2013 年 9 月 1 日开始, 安庆和休宁开始试用能见度自动观测仪代替人工观测, 其他测站直到 2013 年年底能见度资料都是人工观测, 鉴于仪器观测的站点少且时间短, 本文未进行能见度订正。从建站早、资料全的测站观测记录看, 20 世纪 50 年代初安徽省不少地方都有霾天气发生, 但 1980 年之前各地霾的发生频次较低、且 1980 年开始能见度的记录方法发生了改变, 因此, 将重点分析 1980 年之后霾天气变化趋势及变化原因。

### 2.2 霾日重建方法

鉴于中国地面气象观测规范中缺乏对霾的客观判断标准, 导致其观测记录受观测员主观判断的影响较大, 也与业务规定的变化相关, 如部分台站早期长期无霾的记录, 这与事实不符, 近期, 由于媒体关注、政府和气象部门重视程度加强, 观测记录逐渐合理。为开展霾的气候变化研究, 吴兑等 (2010) 介绍了国际上常用的 3 种历史资料处理方法。此后, 很多研究人员都采用基于能见度与相对

湿度的重建方法得到霾天气的历史记录, 即吴兑等 (2010) 文中的第 2 种方法 (排除其他有视程障碍的天气现象后, 日均能见度低于 10 km, 日均相对湿度低于 90% 算一个霾日) (童尧青等, 2007) 和第 3 种方法 (排除其他有视程障碍的天气现象后, 14 时 (北京时间, 下同) 的能见度低于 10 km、相对湿度低于 90% 算一个霾日) (赵普生等, 2012; 符传博和丹利, 2014)。这两种方法都是利用能见度 ( $V_{is}$ ) 和相对湿度 (RH), 简单易行。日均值中含有夜间和早晨的观测, 容易受辐射雾的影响和人眼在昼夜对目标物的不同反应的影响, 而用 14 时的观测值可能会低估霾记录。Zhao et al. (2011) 对这两种方法进行了较详细的比较, 发现用 14 时实测资料重建霾日的方法在较大区域和较长时间范围内更能反映霾天气的实际变化特征。最近, 吴兑等 (2014) 也以首都北京市、天津市、河北省和山西省 (简称京津冀晋) 为例对上述第 2、3 两种方法进行了比较分析, 发现两种方法得到的霾日空间分布趋势和典型城市霾日长期变化趋势都比较相似, 第 3 种方法得到的霾日数比第 2 种方法得到的霾日数低。本研究分别使用上述两种方法重建各站霾记录, 发现两种方法得到安徽省霾的空间分布形势一致。图 1 给出了用这两种方法得到的合肥年霾日数与观测记录的比较, 可见使用第 3 种方法重建的合肥年霾日数与观测记录的变化趋势一致性更好 (二者间的相关系数为 0.94), 而用第 2 种方法得到年霾日数与观测记录的变化趋势的一致性稍差 (二者间的相关系数为 0.82), 因此, 下文使用的霾记录为用第 3 种方法重建的结果。

另外, 根据 2010 年颁布的国家行业标准《霾的观测和预报等级》规定 (中国气象局, 2010), 按照能见度范围对霾天气进行了分级: 轻微 ( $5 \text{ km} \leq V_{is} < 10 \text{ km}$ ,  $\text{RH} < 90\%$ )、轻度 ( $3 \text{ km} \leq V_{is} < 5 \text{ km}$ ,  $\text{RH} < 90\%$ )、中度 ( $2 \text{ km} \leq V_{is} < 3 \text{ km}$ ,  $\text{RH} < 90\%$ ) 和重度 ( $V_{is} < 2 \text{ km}$ ,  $\text{RH} < 90\%$ ) 共 4 个等级。

## 3 2013 年安徽霾分布情况

根据重建结果, 2013 年是安徽省历史上霾最严重的一年, 全省平均霾日数显著高于其他年份, 因此首先单独介绍 2013 年霾的情况。2013 年, 安徽省 80 个地面测站中, 仅泗县、望江、黄山市和黄山光明顶等 4 个测站无霾天气记录。从空间分布来看, 以合肥为中心的江淮中部、沿淮中部、沿江中

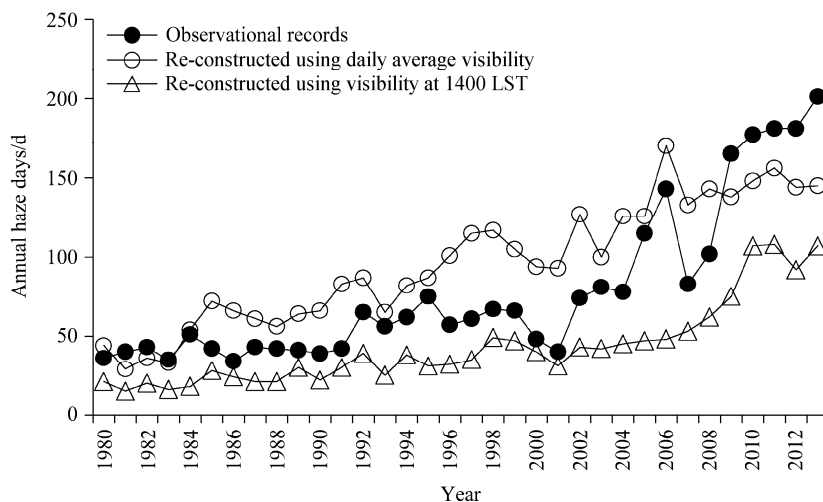


图1 两种重建方法得到合肥霾日数与观测记录的比较

Fig. 1 Annual haze days reconstructed by two methods compared with observational records in Hefei

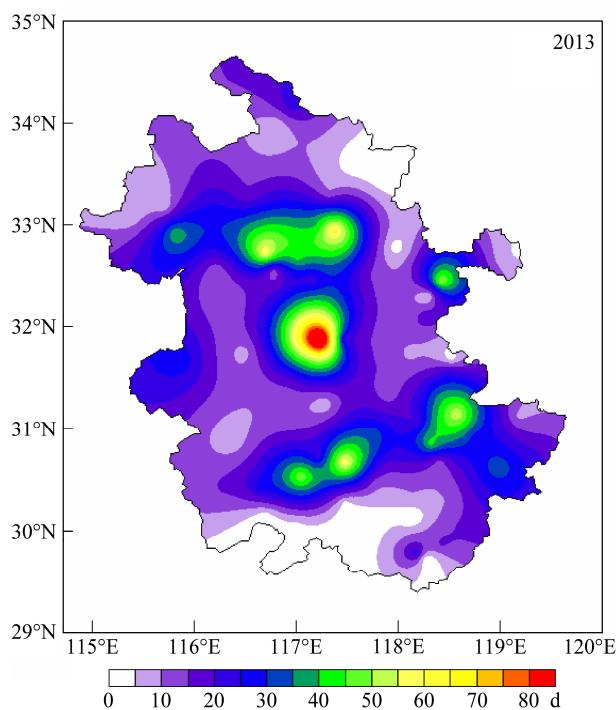


图2 2013年安徽霾日数分布(单位:d)

Fig. 2 Distribution of annual haze days in Anhui Province in 2013 (units: d)

东部及江淮东部均为霾的高发区(超过40 d)(图2)。具体地,12个测站年霾日数超过40 d,8个测站年霾日数超过50 d(凤台60 d、蚌埠64 d、来安51 d、肥西57 d、合肥107 d、芜湖县55 d、安庆50 d、池州60 d),全省平均霾日数接近20 d,而2000~2012年,大部分年份不足10 d。

2013年不仅是安徽省霾日数最多的一年,也是能见度低于5 km的轻度以上霾出现次数最多的一

年,全省达到245站·d。此前,这个数值最多的是2006年,为206站·d,其他年份均低于200站·d。2013年,出现轻度以上霾最多的是合肥(22 d)、其次是池州(18 d),超过10 d的还有阜阳、阜南、凤台、南陵。部分测站还出现了能见度低于3 km的中度霾和重度霾,如阜南、阜阳、池州、南陵等测站超过5 d。

#### 4 1980~2013年安徽霾的变化趋势

经检查发现,即使在1980年之后,仍然有部分测站存在能见度观测记录不连续现象,为保证趋势分析结果的可比性,删去存在观测不连续现象的10个站点。另外,黄山光明顶和九华山海拔较高,也不考虑,最后,剩68个有效站点。

##### 4.1 1980~2013年安徽霾日数的年际变化

图3给出了安徽68个地面测站平均霾日数的年际变化。由图3可见,1980年以来,安徽省平均年霾日数总体呈上升趋势,且年际波动较大。20世纪80年代初,全省平均约5 d;1998年上升到接近10 d,随后,略有下降,2005年出现一个低值(6 d);2005~2006年有一个跳跃,2006~2012年,维持在8 d以上。但可以看到2008~2012年有下降的趋势,这与长三角地区(符传博和丹利,2014)和华北地区(Fu et al., 2014)的趋势一致,而上述工作并未报道2008~2012年霾日数下降的原因。

尽管安徽霾的年发生次数呈明显的上升趋势,且部分地区增多迅速,但总体上仍然以轻微霾为主,1980~2012年,轻微霾占总霾日数的比例在

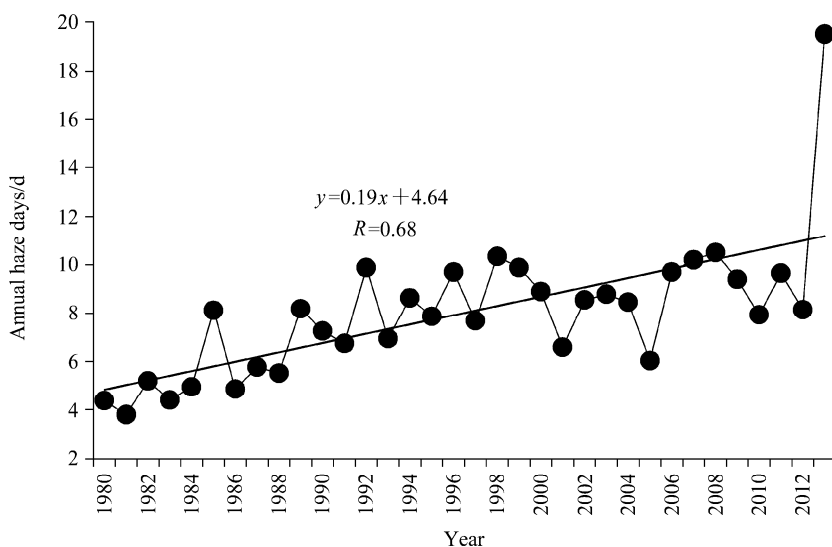


图3 1980~2013 年安徽平均年霾日数

Fig. 3 Annual haze days averaged over 68 stations in Anhui Province from 1980 to 2013

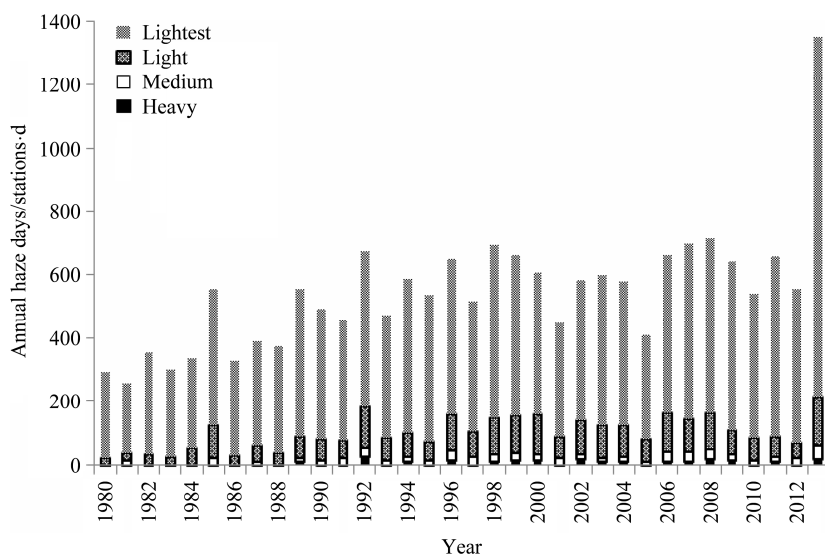


图4 1980~2013 年全省 68 站各级霾日数年变化 (单位: 站·d)

Fig. 4 Annual haze days of all classes summed at 68 stations in Anhui Province (units: station·d)

73%~93% (图4)。此外, 由图4可见, 1980~2012年, 轻度以上等级霾的发生频次有先升高后降低的趋势, 峰值在2008年。

#### 4.2 1980~2012 年阶段性年均霾日数空间分布的演变

图5给出了1980~1989年、1990~1999年、2000~2009年、2010~2012年四个时段年均霾日数分布。(1) 20世纪80年代, 改革开放初期, 中国经济进入高速发展时期, 但安徽省工业化和城市化水平还比较低, 如全省工业燃煤量还不到50万吨, 合肥市的建成区(指城市行政区内实际已成片

开发建设、市政公用设施和公共设施基本具备的地区)面积还不到60 km<sup>2</sup>。但还是有很多地方出现了霾, 平均为5.5 d, 大部分测站(55站), 年均霾日数在5 d以下, 只有少部分测站(12站)年均霾日数在10 d以上, 在沿江到江淮有一些孤立的高发测站(高于15 d)。值得注意的是, 除了合肥站, 这些高发站点的位置并不在地级市。(2) 20世纪90年代, 全省平均年霾日数为8.5 d, 超过一半(35站)测站年均霾日数在5 d以上, 出现了与80年代高发站点不同的霾高发测站(年均超过25 d), 但这些站点仍然是孤立的, 分别是沿江的望江(42.2

d) 和池州 (42.8 d)、省会合肥 (34.8 d)、淮北北部的萧县 (28.8 d) 和灵璧 (27.6 d)。(3) 进入 21 世纪 2000~2009 年, 全省平均年霾日数为 8.7 d, 年均霾日数低于 5 d 的范围在缩小, 年均霾日数 10 d 以上的范围大增, 沿江西部和淮北北部的孤立高发点消失, 出现了小范围的年均霾日数大于 25 d 的高值区, 但其位置与 20 世纪 90 年代并不一致, 分别为: 以合肥为中心的江淮中部地区、以淮南为中心的沿淮中部地区、以池州为中心的沿江中部地区, 其中, 合肥、池州和淮南的年均霾日数分别为 48.6、31.5 和 26.8 d。(4) 2010~2012 年, 各地霾日数有升有降, 如淮北北部和江淮之间的大部分地区都明显下降, 合肥附近及沿淮东部明显上升, 全省平均为 8.6 d; 与 2000~2009 年相比, 沿淮地区霾日数剧增, 蚌埠 3 年平均达到 53.3 d, 江淮之间中部以合肥为中心的高发区继续增强、扩展, 合肥年均霾日数高达 102.3 d; 沿江大部分地方年均霾日

数都在 5 d 以上, 局部 15 d 以上。另外, 值得关注的是, 最近 3 年, 江淮之间西部的金寨和东部的来安年均霾日数分别高达 26.0 和 21.3 d, 可见霾不是城市特有的现象。

## 5 不同地区年霾日数变化趋势

### 5.1 不同地理位置霾日数的变化趋势

根据 2010~2012 年安徽年均霾日数分布情况 (图 5) 将安徽省分为淮北北部、沿淮、江淮之间西部、江淮之间东部 (含合肥)、沿江、皖南南部等 6 个子区, 并分别统计各子区 1980~2013 年逐年平均霾日数 (图 6)。可见, 不同地区存在不同的变化趋势, 但各子区年霾日数都在 2013 年达到历年中最高。

具体来看: (1) 淮北北部地区, 平均霾日数在 1980~1994 年波动上升, 1995~2006 年, 有起伏, 趋势不明显, 2006~2012 年下降趋势明显。1984

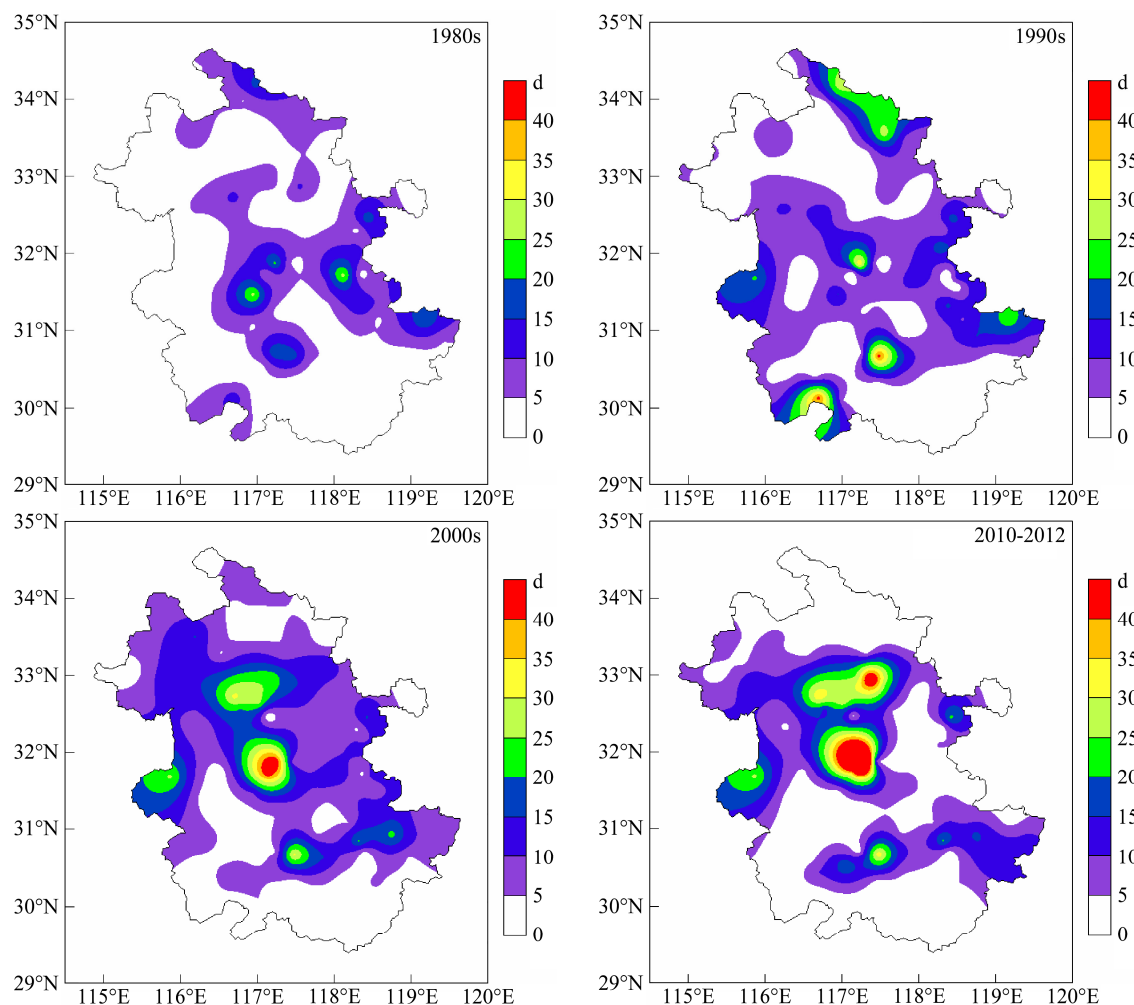


图 5 1980~2012 年安徽省霾日数年代际分布特征 (单位: d)

Fig. 5 Distributions of annual-average haze days in different periods (units: d)

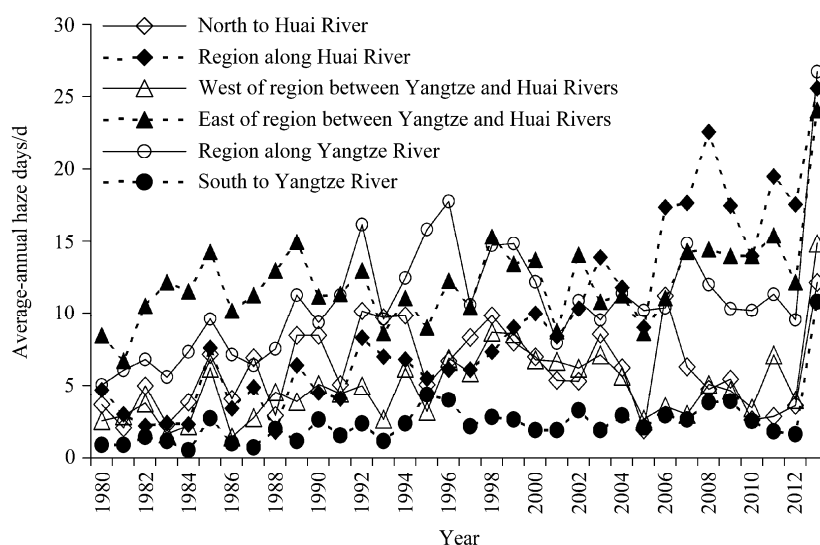


图 6 1980~2013 年安徽各子区平均霾日数年变化

Fig. 6 Annual haze days averaged over different sub-regions in Anhui Province from 1980 to 2013

年及以前, 平均霾日数维持在 5 d 以下; 1985~2006 年, 除个别年份, 都在 5~10 d; 2006 年为 11 d, 之后逐步下降, 2010~2012 年连续 3 年维持在 3 d 左右。(2) 沿淮地区, 平均霾日数上升趋势明显, 尤其是最近 10 年, 已成为平均霾日数最高的地区; 1984 年之前, 该地区的平均霾日数也在 5 d 以下; 1985~1997 年, 基本上维持在 5 d 左右; 1998 年之后, 迅速上升; 2008 年高达到 22.6 d, 其后基本上维持在 15 d 以上。(3) 受省会合肥的影响, 江淮之间东部一直是平均霾日数较高的地区。2005 年之前, 有微小的上升趋势, 除了 2013 年, 平均霾日数虽有起伏, 但变化不是太大, 基本上维持在 10~15 d。(4) 沿江地区的平均霾日数表现为先升后降的趋势, 若不考虑 2013 年, 1996 年最高(为 17.8 d); 1991 年之前, 沿江地区的霾日数仅次于江淮之间东部地区, 1992~1996 年, 该地区平均霾日数各子区中最高, 1997 年之后, 该地区平均霾日数呈下降趋势, 但仍然在 6 个子区中居第 3 位。(5) 受金寨的影响, 以大别山区为主的江淮西部的平均霾日数在 1998 年之前呈上升趋势, 与沿淮差别不大, 之后呈下降趋势, 到 2004 年后属于低值区, 与皖南南部接近。(6) 皖南南部山区为全省霾日数的低值区, 平均霾日数变化不大, 且基本上保持在 5 d 以下; 2010~2012 年, 稳步下降。

总的来看, 在大部分地区霾日数呈上升趋势的同时, 对应的是各地 14 时平均能见度下降, 平均能见度的标准差以及能见度标准差与平均能见度

的比值都在下降(图 7), 可见, 安徽省霾的区域性特征越来越明显, 这与华北近年来的发展趋势一致(王喜全等, 2013)。

## 5.2 城市测站和县城测站霾日数变化趋势

按测站所在城市规模把全部测站分为两类: 位于地级市的城市测站, 代表城市情况, 共 17 个(含巢湖站), 余下的为位于县城的测站, 代表乡村情况。图 8 给出了两类测站平均霾日数的年变化情况。两类测站都是 2013 年平均霾日数显著高于其他年份, 城市和乡村测站分别为 30.3 和 16.0 d。1988 年之前, 两类测站的霾日数差别不大, 之后, 差别逐步加大, 两类测站呈现出显著不同的变化趋势, 城市测站霾日数呈显著增加的趋势, 年增长率为 0.46 d ( $R=0.86$ ), 2011 年达到 2013 年以外的另一个峰值(19 d); 县城测站霾日数也呈微弱的上升趋势, 年增长率仅为 0.10 d ( $R=0.45$ ), 1998 年为 2013 年以外的另一个峰值(9.3 d), 之后呈下降趋势。

## 6 安徽霾天气演变的原因分析

霾的本质是细粒子污染, 一般产生于静风、稳定天气背景下。也就是说, 霾天气的出现与空气污染密切相关, 人为污染物排放是造成霾天气的内因, 其次是气象条件, 即外因, 因为一个地区或城市大气污染物的浓度一方面决定于局地污染源的强度, 另一方面决定于当地的输送和扩散条件。

### 6.1 安徽及周边省份大气污染物来源的变化情况

煤炭消耗量能大致反映一个地方的工业发展

和大气污染物排放水平,但由于技术的进步,不同年代,同样的煤耗量所排放大气污染物总量会有不同,而最终影响空气质量的是排入大气的污染物的量。图 9a 给出了 1988~2012 年安徽省逐年煤耗量和安徽及周边省份 2003~2012 年的  $\text{SO}_2$  排放量。由图可见,1990 年之后,安徽煤耗总量逐步上升,1996~2000 年有个短暂的停顿,之后呈逐步上升趋势。2006 年之前,安徽及周边省份  $\text{SO}_2$  排放量都呈明显的上升趋势,但其后,随着中国“一控双达标”和“总量控制”措施的实施,虽然煤炭消耗量总体依然呈明显增加趋势,但各省  $\text{SO}_2$  排放量明显下降。以此类推,由燃煤造成的大气颗粒物的排放量相应

地也在减少,但 2006 年后  $\text{SO}_2$  排放量下降并没有立即带来城市霾日数的下降,虽然县城测站霾日数在 2008 年后呈明显的下降趋势,但这与 2006 年开始的  $\text{SO}_2$  排放量下降时间上也不一致。分别对图 8 中两类测站霾日数变化趋势与图 9a 中的安徽省煤耗量与  $\text{SO}_2$  排放量进行相关性分析,发现地级市测站霾日数的年变化与煤耗量成显著的正相关 ( $R = 0.91$ ),而与  $\text{SO}_2$  排放量无显著相关,县城测站的平均年霾日数与煤耗量和  $\text{SO}_2$  排放量之间均无相关性。因此,工业化可能是早期安徽城市霾日数增加的主要原因,而 2006 年之后  $\text{SO}_2$  排放量下降不能解释地级市或县城霾日数的变化趋势,也就是说燃

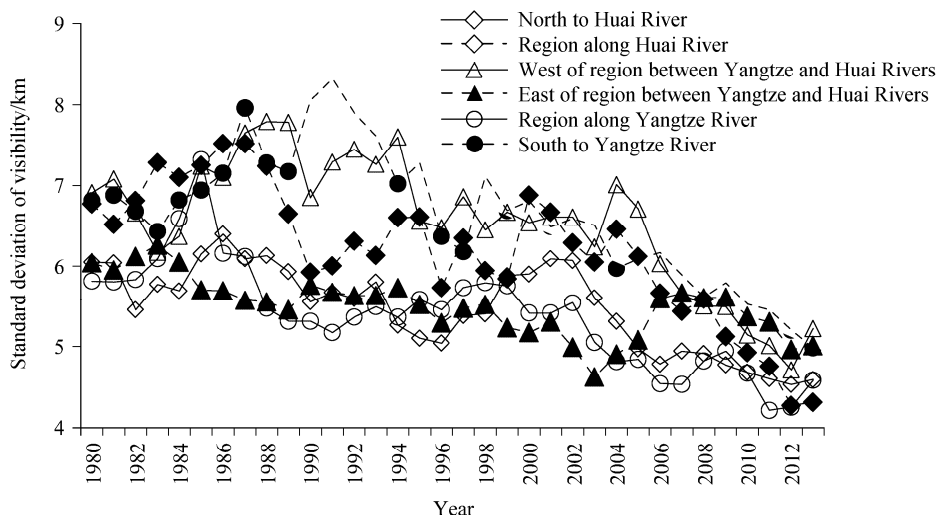


图 7 1980~2013 年安徽各子区 14 时能见度的标准差年变化

Fig. 7 Annual mean standard deviation of visibilities at 1400 BT (Beijing Time) averaged over different sub-regions in Anhui Province from 1980 to 2013

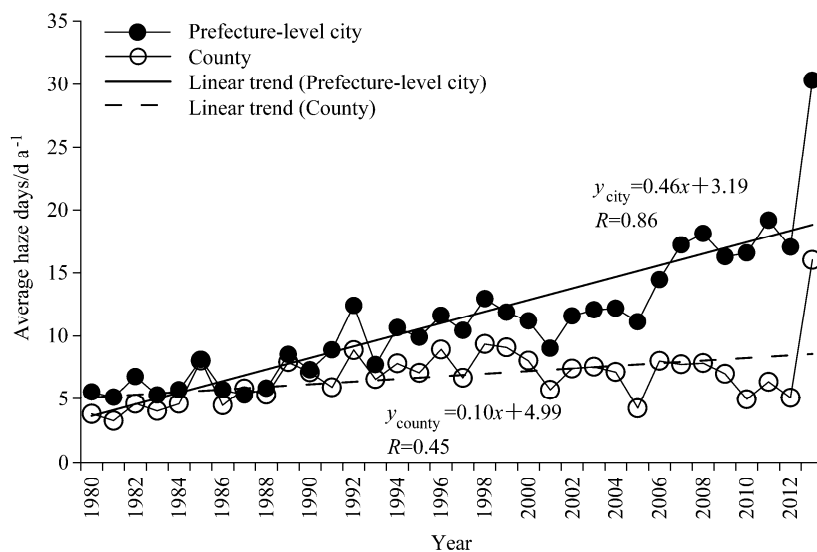


图 8 1980~2013 年安徽两类测站平均霾日数年变化

Fig. 8 Annual haze days averaged at two kinds of stations in Anhui Province from 1980 to 2013

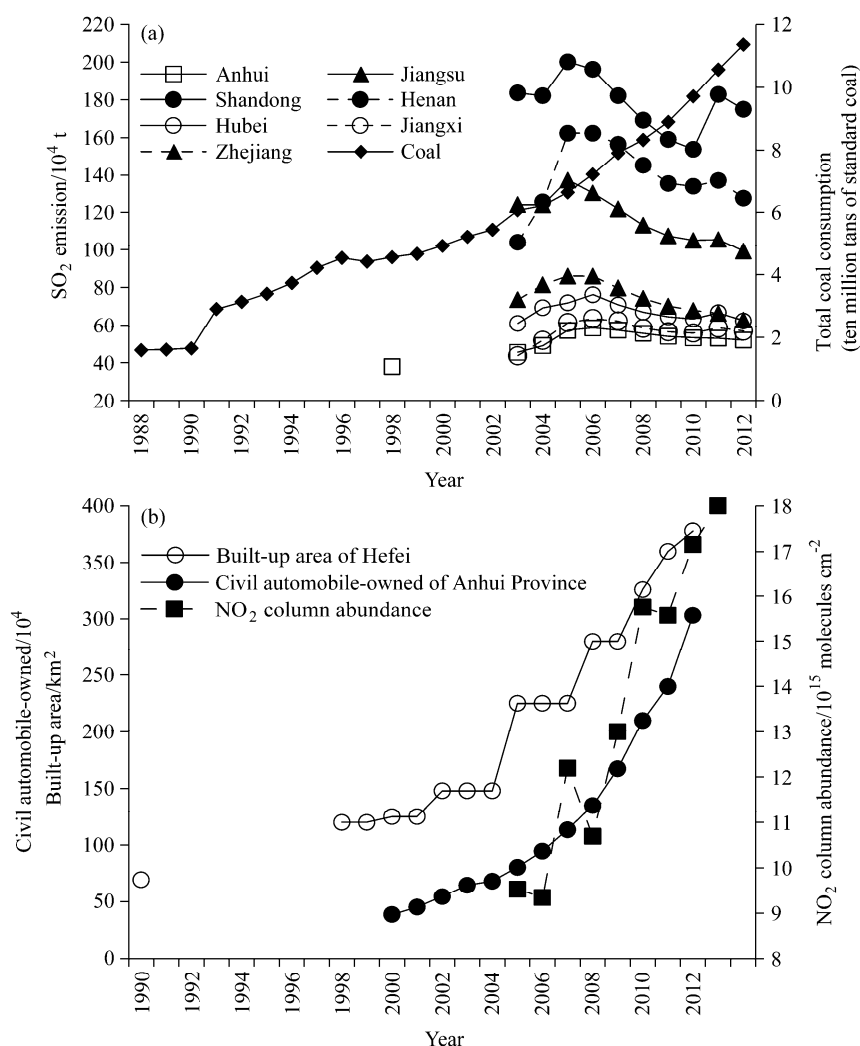


图9 (a) 安徽及周边省份二氧化硫排放量及安徽省煤耗量, (b) 安徽省民用汽车拥有量、合肥市建成区面积及安徽上空对流层  $\text{NO}_2$  柱含量

Fig. 9 (a) Yearly  $\text{SO}_2$  emissions in Anhui and surrounding provinces and annual coal consumption in Anhui Province, and (b) averaged  $\text{NO}_2$  column content over Anhui Province, total household cars in Anhui and the built-up area of Hefei

煤增多不是近年来城市霾日数增长的原因。

城市化是城市霾日数上升的另一个重要原因。一方面,城市在扩张过程中大量的基础建设活动增加的地面扬尘,是大气气溶胶的重要来源之一,在环境湿度适宜时,大气中的硝酸和硫酸可以在扬尘中的大颗粒表面发生化学反应(毛华云等, 2011);另一方面,城市高楼增加会使地面风速降低、扩散能力下降。从 20 世纪 90 年代末房改开始,大量商品房上市,城市进入高速扩张期,以合肥市为例,1990 年的建成区面积不到  $70 \text{ km}^2$ , 1998 年才  $120 \text{ km}^2$ , 2000 年之后迅速扩大,到 2012 年已经超过  $350 \text{ km}^2$  (图 9b)。城市化的过程中,汽车保有量大幅度上升(图 9b),汽车尾气的排放是大气中氮氧化物的重要来源之一,直接导致大气中  $\text{NO}_2$  浓度上

升。而氮氧化物一方面是光化学反应的主要参加者,其浓度上升会导致臭氧、硝酸盐等细粒子浓度上升,降低大气能见度,另一方面  $\text{NO}_2$  本身也有较强的消光作用,是城市地区污染大气中对可见光吸收最强的气体,相对于  $\text{NO}_2$ ,其他污染气体对可见光的吸收能力要弱得多(刘新民和邵敏, 2004)。据卫星监测结果,近 10 年中国东部地区对流层  $\text{NO}_2$  柱含量显著增加(石春娥等, 2014),包括安徽地区(图 10),尤其是北边和东边。比较图 10 与图 5 可以发现,2000 年之后,安徽省内两个霾的高发区与对流层  $\text{NO}_2$  柱含量的高值区基本一致。从 2003 年到 2011 年,安徽上空  $\text{NO}_2$  柱含量平均值增长了近一倍(图 9b),而且比较图 9b 中  $\text{NO}_2$  柱含量与图 8 中两类测站霾日数的变化趋势,可以发现  $\text{NO}_2$

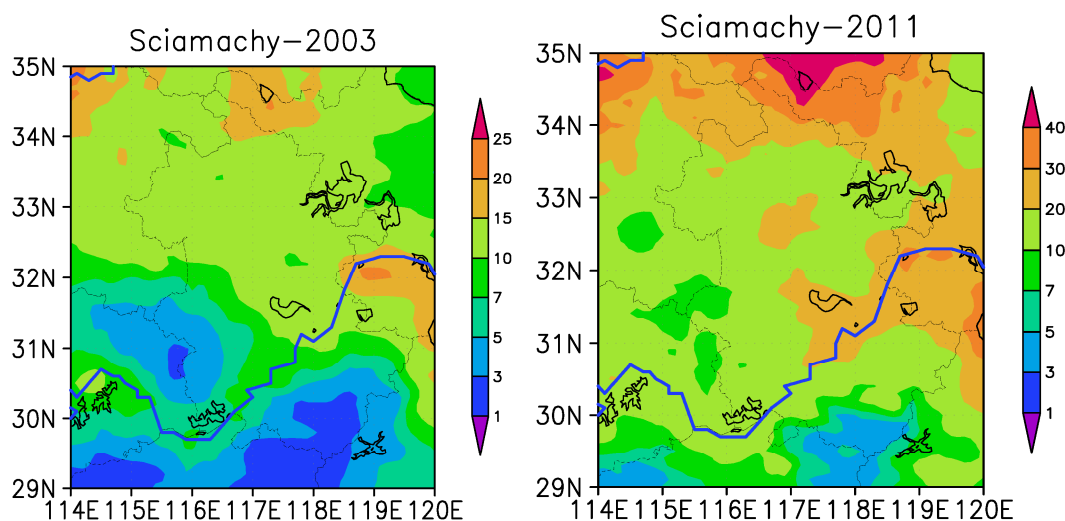


图 10 环境卫星监测 2003 年和 2011 年对流层  $\text{NO}_2$  分子柱含量分布 (单位:  $10^{15}$  分子  $\text{cm}^{-2}$ , 资料来自 Sciamachy 卫星)

Fig. 10 Distributions of tropospheric  $\text{NO}_2$  column contents from Sciamachy satellite over Anhui Province in 2003 and 2011 (units:  $10^{15}$  molecules  $\text{cm}^{-2}$ )

柱含量与地级市测站霾日数的变化趋势有很好的-一致性, 相关系数为 0.83 (通过了 99% 信度水平检验), 而与县城测站霾日数的变化趋势无相关性 (表 1)。

表 1 安徽城市测站、县城测站平均年霾日数与多个因子的-相关系数

Table 1 Correlation coefficients between annual average haze days at two kinds of stations and different impact factors

|             | 霾日数与各因子的相关系数 |                   |       |                   |       |
|-------------|--------------|-------------------|-------|-------------------|-------|
|             | 煤耗量          | $\text{SO}_2$ 排放量 | 汽车保有量 | $\text{NO}_x$ 柱含量 | 季风指数  |
| 地级市霾日数      | 0.91         | 0.29              | 0.80  | 0.83              | 0.08  |
| 县城霾日数       | -0.29        | 0                 | -0.43 | -0.31             | -0.53 |
| 样本数 ( $n$ ) | 25           | 10                | 13    | 10                | 34    |

注: 99% 信度的临界相关系数: 0.506 ( $n=25$ )、0.684 ( $n=13$ )、0.765 ( $n=10$ )、0.449 ( $n=32$ ); 95% 信度的临界相关系数: 0.396 ( $n=25$ )、0.553 ( $n=13$ )、0.632 ( $n=10$ )、0.349 ( $n=32$ )

大气中  $\text{NO}_2$  浓度的升高, 意味着二次颗粒物硝酸盐浓度的上升。硝酸盐是细粒子的重要组成部分, 硝酸盐大部分为强吸湿性气溶胶, 潮解点较低, 实验室测量结果表明,  $25^\circ\text{C}$  时, 硝酸钠的潮解点在 70% 左右, 硝酸铵的潮解点更低, 60% 附近, 低于硫酸铵的潮解点 (80% 左右) (Martin, 2000), 说明硝酸盐比硫酸盐更容易吸湿增长, 而且, 硝酸盐气溶胶吸湿长大前后粒径增长明显 (王轩, 2010)。石春娥等 (2016) 在合肥市进行的气溶胶分级采样分析结果显示霾天  $\text{PM}_{2.5}$  中可溶性无机离子中  $\text{NO}_3^-$  浓度最高, 且浓度的粒径谱显示其峰值粒径在  $1\sim 2\ \mu\text{m}$  之间, 而晴空天  $\text{NO}_3^-$  浓度谱的最大峰值在  $2.1$

$\mu\text{m}$  以上; 霾天硫酸根的最大峰值也在  $1\sim 2\ \mu\text{m}$  之间, 但晴空日其最大峰值在  $1\ \mu\text{m}$  以下。考虑到民用汽车的使用者大部分集中在城市地区 (比如地级市), 而  $\text{NO}_2$  属于短寿命气体, 其在大气中的浓度分布与排放源分布有较好的一致性 (Shi and Zhang, 2008),  $\text{NO}_2$  及其生成的气溶胶应该主要分布在城市及周边地区, 这就可以较好地解释为什么在 2008 年之后, 广大农村霾日数有下降趋势的同时, 城市霾日数依然持续上升, 如城市快速扩张的 10 年, 也是合肥市霾日数迅猛增多的 10 年 (图 8、图 9)。可见, 城市快速扩张、汽车拥有量激增导致对应的大气污染物排放量的增加可能是导致 2000 年之后城市霾日数显著增多的主要原因。

## 6.2 局地气象因子的影响

以合肥为例探讨局地气象要素的变化对霾日数的影响。主要考虑风速和相对湿度 (图 11), 因为风速会影响污染物的扩散、输送, 在高湿环境下, 很多大气颗粒物会吸湿增长, 消光作用增强, 即在同样多的颗粒物浓度下, 相对湿度上升对应着能见度的下降。由图 11 可见, 2000 年之后, 合肥市非降水日地面风速呈明显的下降趋势, 即不利于污染物的扩散, 同期, 霾日数显著上升, 说明合肥近年来霾日数上升可能与地面风速下降有关。但注意到, 1955~1965 年也出现了 2000 年之后那样的风速下降趋势, 那时候的相对湿度总体上高于 2000 年之后, 但那时候合肥并没有出现霾日数上升现象。这说明近 10 年来霾日数显著上升的关键因子

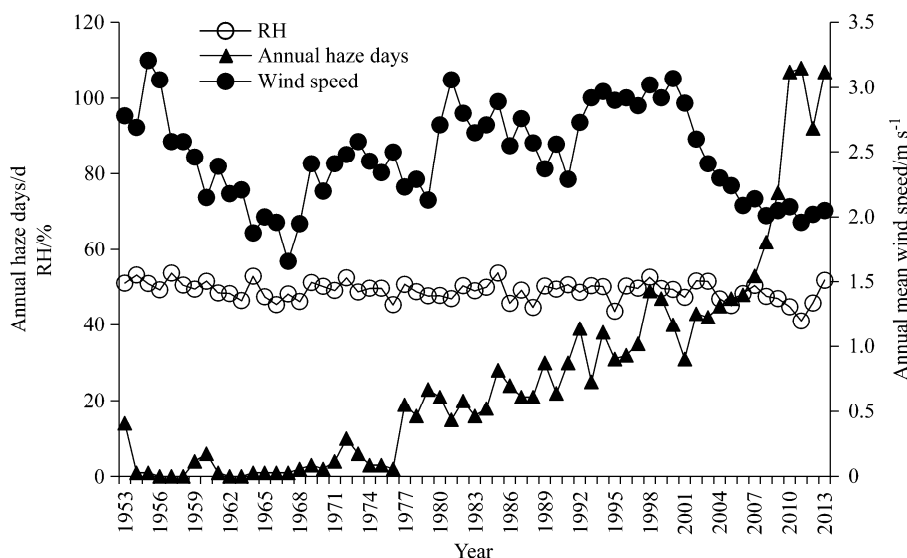


图 11 1953~2013 年合肥市霾日数及非降水日地面风速、14 时相对湿度变化趋势

Fig. 11 Annual haze days, annual mean surface wind speeds and annual mean relative humidity at 1400 BT averaged for non-rain days

是排放源增加的结果。

### 6.3 大尺度环流的影响

最近的一些研究表明, 东亚季风、全球环流等大尺度系统也会对亚洲的雾产生影响。如 Niu et al. (2010) 的研究认为东亚冬季风减弱造成中国中东部地区地面风速下降、相对湿度增加、冬季雾的发生频率显著增加。Syed et al. (2012) 认为对流层上层产生于北大西洋上空的波列会通过影响南亚地区冬季边界层的稳定性和相对湿度而影响该地区冬季雾的多寡。为讨论大尺度系统对安徽霾的影响, 利用 NCEP/NCAR 再分析资料计算了朱艳峰 (2008) 提出的季风指数年变化。该指数定义为 500 hPa 高度中低纬度和中高纬度两个区域纬向风切变, 从环流角度直观地体现了东亚季风强弱对对流层中层风场的影响, 其值越大说明季风越强。其计算公式如下:

$$I_{EAWM} = \overline{U}_{500(25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E})} - \overline{U}_{500(50^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E})}, \quad (1)$$

其中,  $\overline{U}_{500(25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E})}$  为  $(25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E})$  范围内 500 hPa 纬向风的平均值,  $\overline{U}_{500(50^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E})}$  为  $(50^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E})$  范围内 500 hPa 纬向风的平均值。

为减少人为排放源的影响, 我们选取安徽省县级测站平均霾日数与季风指数进行比较, 从而探讨大尺度季风环流对安徽霾演变的影响 (图 12), 由图 12a 可见, 二者之间存在显著的负相关 ( $r =$

$-0.53$ ), 通过了 99% 信度水平检验。可见, 东亚季风的强弱对安徽省霾的多寡有着密切联系。图 12b 给出了 1954~2013 年季风指数的年变化和县城测站平均霾日数的年变化。从 20 世纪 50 年代到现在, 季风指数有较大幅度的波动, 但总体呈下降趋势, 1977 年以前, 大部分年份都在 0 以上, 1977 年及之后, 大部分年份都在 0 以下。图 12b 显示, 1980 年之后, 季风指数为峰值的几个年份, 如 1984、1988、1991、2005、2012 年, 对应的都是霾日数比较低的年份; 而在季风指数比较低的年份, 却不一定都对应着霾日数多的年份, 如 2002、2007、2013 年季风指数极低, 对应着霾日数较高, 尤其是 2013 年。然而, 1997 年的季风指数在 20 世纪 90 年代后期是最低的, 其对应的霾日数却不高, 这可能与大气污染物排放强度有关, 如从现有的资料看, 跟前后年份相比, 1997 年安徽省煤耗量是一个小低值 (图 9a)。另外, 从安徽省统计年鉴上城市发展概况看, 20 世纪 90 年代前期, 包括 1997 年, 合肥城市化水平还不太高, 1998 年建成区面积才  $120 \text{ km}^2$ , 且属于地面风速偏高的时段。可见, 季风的强弱通过对地面和低空风场的影响而影响到安徽霾的多寡。此外, 2007~2012 年, 季风指数单调上升, 意味着季风强度增强, 这跟 2008~2012 年县城测站霾日数的下降有较好的对应关系 (图 12b), 这说明 2008~2012 年县城测站霾日数下降在较大程度上是季风增强的结果。

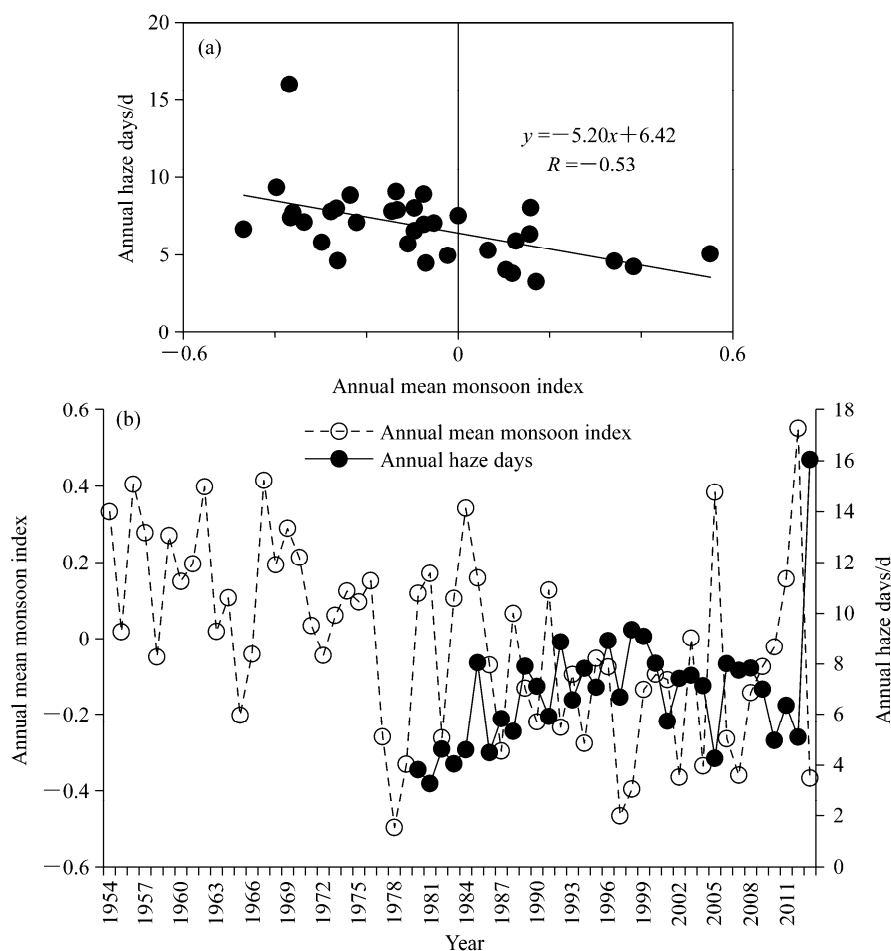


图 12 季风指数与安徽县级测站平均霾日数比较: (a) 点聚图; (b) 年变化

Fig. 12 Comparison of annual mean monsoon index and annual haze days averaged at county stations: (a) Scatter plot; (b) annual variation

值得说明的是, 虽然 2006 年之后, 安徽及周边省份  $\text{SO}_2$  排放量下降 (图 9a)、2007~2012 年季风指数单调上升 (图 12b), 但城市霾日数并没呈现明显的下降趋势 (图 8、图 11)。究其原因, 可能是在此期间城市在快速扩张、增高, 地面风速下降, 汽车保有量急剧增大, 导致  $\text{NO}_x$  排放量急增 (如对对流层  $\text{NO}_2$  柱含量加速上升), 抵消了  $\text{SO}_2$  排放量下降和季风增强的作用。

## 7 结论

利用 1980~2013 年安徽省 80 个气象站地面观测资料, 分析了安徽霾日数的时空变化趋势, 同时结合 Sciamachy 卫星对流层  $\text{NO}_2$  资料、中国国家统计局的分省  $\text{SO}_2$  排放资料和民用车保有量资料, 以及用 NCEP/NCAR 再分析资料计算的东亚冬季风指数等, 讨论了安徽霾日数变化的原因, 主要结论如下:

(1) 1980 年以来, 安徽霾天气总体呈上升趋势, 但仍以轻微霾为主。不同年代, 霾的高发区不同, 2000 年之后, 有 3 个大的霾高发区, 分别为: 以合肥为中心的江淮之间中部高发区、以池州为中心的沿江中部高发区和以淮南为中心的沿淮中部高发区。不同地区年均霾日数的变化趋势差异较大: 皖南南部霾日数一直较低且变化也最平缓; 沿淮地区在 20 世纪 90 年代中期开始呈持续上升的趋势, 2000 年以来已成为平均霾日数最高的地区。

(2) 按测站所在位置分类统计表明, 地级市测站和县城测站年霾日数呈现不同的变化趋势: 地级市测站年霾日数显著上升, 县城测站年霾日数变化平缓, 趋势不显著, 且在 2008~2012 年之间, 有呈下降趋势。

(3) 2000 年之后, 两个霾的高发区与对流层  $\text{NO}_2$  柱含量的高值区基本一致。地级市平均霾日数的变化趋势与对流层  $\text{NO}_2$  柱含量及民用汽车保有

量的变化趋势都呈显著的正相关,而与安徽省  $\text{SO}_2$  排放量和东亚冬季风指数均无明显的相关性。县城及县级市测站平均年霾日数与东亚冬季风指数间存在显著的负相关,而与全省  $\text{SO}_2$  排放量、汽车保有量、对流层  $\text{NO}_2$  柱含量等都无明显相关性。对比来看,汽车尾气排放量的增加在很大程度上解释了 2000 年之后地级市霾日数显著增加,而季风环流的改变作为主要的气候驱动因子在较大程度上解释了县及县级市测站霾日数的变化。

**致谢** 感谢匿名评审专家对本文所给予的非常有帮助的建议和意见。

### 参考文献 (References)

- 符传博, 丹利. 2014. 重污染下我国中东部地区 1960~2010 年霾日数的时空变化特征 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 219–226. Fu Chuanbo, Dan Li. 2014. Spatiotemporal characteristics of haze days under heavy pollution over central and eastern China during 1960–2010 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 219–226.
- Fu G Q, Xu W Y, Yang R F, et al. 2014. The distribution and trends of fog and haze in the North China Plain over the past 30 years [J]. Atmos. Chem. Phys., 14, 11949–11958.
- 高怡, 张美根. 2014. 2013 年 1 月华北地区重雾霾过程及其成因的模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 140–152. Gao Yi, Zhang Meigen. 2014. Numerical simulation of a heavy fog-haze episode over the North China Plain in January 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 140–152.
- 顾凯华, 樊曙先, 黄红丽, 等. 2011. 南京冬季雾天颗粒物中 PAHs 分布与气象条件的关系 [J]. 中国环境科学, 31 (8): 1233–1240. Gu Kaihua, Fan Shuxian, Huang Hongli, et al. 2011. Characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in particles and the influence of foggy weather conditions during the winter in Nanjing [J]. China Environmental Science (in Chinese), 31 (8): 1233–1240.
- Li W J, Shao L Y. 2012. Chemical modification of dust particles during different dust storm episodes [J]. Aerosol and Air Quality Research, 12 (6): 1095–1104.
- 刘瑞婷, 韩志伟, 李嘉伟. 2014. 北京冬季雾霾事件的气象特征分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 164–172. Liu Ruiting, Han Zhiwei, Li Jiawei. 2014. Analysis of meteorological characteristics during winter haze events in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 164–172.
- 刘新民, 邵敏. 2004. 北京夏季大气消光系数的来源分析 [J]. 环境科学学报, 24 (2): 185–189. Liu Xinmin, Shao Min. 2004. The analysis of sources of ambient light extinction coefficient in summer time of Beijing city [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 24 (2): 185–189.
- 毛华云, 田刚, 黄玉虎, 等. 2011. 北京市大气环境中硫酸盐、硝酸盐粒径分布及存在形式 [J]. 环境科学, 32 (5): 1237–1241. Mao Huayun, Tian Gang, Huang Yuhu, et al. 2011. Mass size distributions and existing forms of sulfate and nitrate at atmospheric environment in Beijing [J]. Environmental Science (in Chinese), 32 (5): 1237–1241.
- Martin S T. 2000. Phase transitions of aqueous atmospheric particles [J]. Chem. Rev., 100 (9): 3403–3453.
- Niu F, Li Z Q, Li C, et al. 2010. Increase of wintertime fog in China: Potential impacts of weakening of the Eastern Asian monsoon circulation and increasing aerosol loading [J]. J. Geophys. Res., 115 (D7): D00K20, doi:10.1029/2009JD013484.
- 任义芳, 王春乙, 赵艳霞. 2010. 气溶胶辐射效应对作物及生态系统的影响综述 [J]. 中国农业气象, 31 (4): 533–540. Ren Yifang, Wang Chunyi, Zhao Yanxia. 2010. Review on impact of atmospheric aerosol radiation effect on crops and ecological system [J]. Chinese Journal of Agrometeorology (in Chinese), 31 (4): 533–540.
- 石春娥, 邓学良, 杨元建, 等. 2014. 2013 年 1 月安徽持续性霾天气成因分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 227–236. Shi Chune, Deng Xueliang, Yang Yuanjian, et al. 2014. Analyses on the causes of the persistent haze in Anhui Province in January 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 227–236.
- 石春娥, 邓学良, 朱彬, 等. 2016. 合肥市不同天气条件下大气气溶胶粒子理化特征分析 [J]. 气象学报, 74 (1): 待发表. Shi Chune, Deng Xueliang, Zhu Bin, et al. Physical and chemical characteristics of atmospheric aerol under the different weather conditions in Hefei. Acta Meteorologica Sinica, 74 (1): in press.
- Shi C E, Fernando H J S, Wang Z F, et al. 2008. Tropospheric  $\text{NO}_2$  columns over east central China: Comparisons between SCIAMACHY measurements and nested CMAQ simulations [J]. Atmos. Environ., 42 (30), 7165–7173.
- Shi C E, Zhang B N. 2008. Tropospheric  $\text{NO}_2$  columns over northeastern North America: Comparison of CMAQ model simulations with GOME satellite measurements [J]. Adv. Atmos. Sci., 25 (1): 59–71.
- Syed F S, Körnich H, Tjernstrom M. 2012. On the fog variability over south Asia [J]. Clim. Dyn., 39: 2993–3005.
- 童尧青, 银燕, 钱凌, 等. 2007. 南京地区霾天气特征分析 [J]. 中国环境科学, 27 (5): 584–588. Tong Yaoqing, Yin Yan, Qian Ling, et al. 2007. Analysis of the characteristics of hazy phenomena in Nanjing area [J]. China Environmental Science (in Chinese), 27 (5): 584–588.
- 王建国, 王业宏, 盛春岩, 等. 2008. 济南市霾气候特征分析及其与地面形势的关系 [J]. 热带气象学报, 24 (3): 303–306. Wang Jianguo, Wang Yehong, Sheng Chunyan, et al. 2008. Analysis of climatic characteristics of haze in Ji'nan [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 24 (3): 303–306.
- 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 [J]. 气候与环境研究, 18 (2): 165–170. Wang Xiquan, Sun Mingsheng, Yang Ting, et al. 2013. Interdecadal change in frequency of dust-haze episodes in North China Plain [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (2): 165–170.
- 王喜全, 杨婷, 王自发. 2011. 灰霾污染的跨控制区影响——一次京津冀与东北地区灰霾污染个案分析 [J]. 气候与环境研究, 16 (6): 690–696. Wang Xiquan, Yang Ting, Wang Zifa. 2011. Impact of dust-haze episode from one air pollution control region to the other—One case study [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (6): 690–696.
- 王轩. 2010. 气溶胶吸湿特性研究. 中国环境科学研究院硕士学位论文. Wang Xuan. 2010. The study on hygroscopic properties of aerosol particles [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Research Academy of

- Environment Sciences.
- 王跃思, 姚莉, 王莉莉, 等. 2014. 2013 年元月我国中东部地区强霾污染成因分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 44 (1): 15–26. Wang Yuesi, Yao Li, Wang Lili, et al. 2014. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China [J]. Science China: Earth Sciences (in Chinese), 57 (1): 14–25, doi:10.1007/s11430-013-4773-4.
- 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 [J]. 中国科学: 地球科学, 44 (1): 3–14. Wang Z F, Li J, Wang Z, et al. 2014. Modeling study of regional severe hazes over Mid-Eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevention and control [J]. Science China: Earth Sciences (in Chinese), 57 (1): 3–13, doi:10.1007/s11430-013-4793-0.
- 吴兑. 2013. 探秘 PM<sub>2.5</sub> [M]. 北京: 气象出版社, pp106. Wu Dui. Insights into PM<sub>2.5</sub> (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, pp106.
- 吴兑, 陈慧忠, 吴蒙, 等. 2014. 三种霾日统计方法的比较分析——以环首都圈京津冀晋为例 [J]. 中国环境科学, 34 (3): 545–554. Wu Dui, Chen Huizhong, Wu Meng, et al. 2014. Comparison of three statistical methods on calculating haze days — Taking areas around the capital for example [J]. China Environmental Science (in Chinese), 34 (3): 545–554.
- 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. Temporal and spatial variation of haze during 1951–2005 in Chinese mainland [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 68 (5): 680–688.
- 杨军, 牛忠清, 石春娥, 等. 2010. 南京冬季雾霾过程中气溶胶粒子的微物理特征 [J]. 环境科学, 31 (7): 1425–1431. Yang Jun, Niu Zhongqing, Shi Chune, et al. 2010. Microphysics of atmospheric aerosols during winter haze/fog events in Nanjing [J]. Environmental Science (in Chinese), 31 (7): 1425–1431.
- 杨元建, 傅云飞, 吴必文, 等. 2013. 秸秆焚烧对中国东部气溶胶时空格局的影响 [J]. 大气与环境光学学报, 8 (4): 241–252. Yang Yuanjian, Fu Yunfei, Wu Biwen, et al. 2013. Impacts of agricultural fire on aerosol distribution over East China during summer harvest time [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics (in Chinese), 8 (4): 241–252.
- 张浩, 石春娥, 邱明燕, 等. 2010. 合肥市霾天气变化特征及其影响因子 [J]. 环境科学学报, 30 (4): 714–721. Zhang Hao, Shi Chune, Qiu Mingyan, et al. 2010. Long-term variation of haze phenomena in Hefei and its impact factors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 30 (4): 714–721.
- 张浩, 石春娥, 谢伟, 等. 2008. 安徽省 1955~2005 年城市大气能见度变化趋势 [J]. 气象科学, 28 (5): 515–520. Zhang Hao, Shi Chune, Xie Wei, et al. 2008. Visibility trends in cities of Anhui Province during 1955–2005 [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 28 (5): 515–520.
- 赵普生, 徐晓峰, 孟伟, 等. 2012. 京津冀区域霾天气特征 [J]. 中国环境科学, 32 (1): 31–36. Zhao Pusheng, Xu Xiaofeng, Meng Wei, et al. 2012. Characteristics of hazy days in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei [J]. China Environmental Science (in Chinese), 2012, 32 (1): 31–36.
- Zhao P S, Zhang X L, Xu X F, 2011. Long-term visibility trends and characteristics in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. Atmos. Res., 101 (3): 711–718.
- 中国气象局. 2007. QX/T 48-2007 地面气象观测规范第 4 部分: 天气现象观测 [S]. 北京: 气象出版社, 10pp. China Meteorological Administration. 2007. QX/T 48-2007 Specifications for surface meteorological observation. Part 4: Observation of weather phenomenon (in Chinese) [S]. Beijing: China Meteorological Press, 10pp.
- 中国气象局. 2010. QX/T 113-2010 霾的观测与预报等级 [S]. 北京: 气象出版社, 8pp. China Meteorological Administration. 2010. QX/T 113-2010 Observation and forecasting levels of haze (in Chinese) [S]. Beijing: China Meteorological Press, 8pp.
- 朱艳峰. 2008. 一个适用于描述中国大陆冬季气温变化的东亚冬季风指数 [J]. 气象学报, 66 (5): 781–788. Zhu Yanfeng. 2008. An index of East Asian winter monsoon applied to description the Chinese mainland winter temperature changes [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (5): 781–788.