

从雾的气候变化看城市发展对雾的影响

石春娥^{1,2} 杨军³ 邱明燕^{1,2} 谢伟¹ 张浩^{1,2}

1 安徽省气象科学研究所, 合肥 230031

2 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230031

3 南京信息工程大学大气物理与大气环境重点实验室, 南京 210044

摘要 利用安徽省78个测站近半个世纪的资料分析了安徽雾的年代际变化特征, 并着重讨论了城市发展对雾的影响。安徽省雾的年代际变化趋势分布不均匀, 以1980年为中心的10年是安徽年均雾日数最高的10年, 以后呈减少趋势。根据两类城市年雾日数演变趋势, 揭示城市在不同的发展阶段对雾的影响不同。最近30年, 城市雾的消散时间明显推后, 平均持续时间增加, 雾内能见度下降。1985年之后, 全省平均雾日数和合肥地区北京时间8时雾内能见距离与全省煤耗量之间存在显著的反相关。城市雾发生率下降的原因可能是城市热岛加强和大气气溶胶粒子增多共同作用的结果。

关键词 雾 年代际变化 城市发展 城市气候 大气气溶胶

文章编号 1006-9585 (2008) 03-0327-10 **中图分类号** P426.4 **文献标识码** A

Impacts of Urban Development on Long-Term Variation of Fog

SHI Chun-E^{1,2}, YANG Jun³, QIU Ming-Yan^{1,2}, XIE Wei¹, and ZHANG Hao^{1,2}

1 *Anhui Institute of Meteorological Sciences, Hefei* 230031

2 *Key Laboratory of Atmospheric Sciences and Satellite Remote Sensing of Anhui Province, Hefei* 230031

3 *Key Laboratory for Atmospheric Physics and Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044

Abstract The spatial distribution and seasonal/long-term variations of fog in Anhui Province are examined using daily meteorological records at 78 stations during the recent half century. Impacts of urban development on fog frequency are also discussed. Fog was more frequent in mountainous areas and less frequent in the foothills close to the Yangtze River, with moderate frequency in the plain north of the Huaihe River in Anhui Province. The highest fog frequency varies with both season and location. The number of days with fog shows an increase in the 1970s and early 1980s and decreases in the mid-80s at most stations. There exist two categories of cities, one reached a peak in fog frequency about 10 years earlier than the other. Impacts of urban development on fog activity are evident and these impacts depend on the degree of the development of the city. During the recent 30 years, the time of fog dissipation occurred later, the average fog duration increased and the visibility within fog decreased. The annual total coal combustion of Anhui was negatively correlated with the average annual fog frequency and visibility at 0800 LST on fog day in Hefei. The authors conclude that the decreasing fog days are the result of the enhancement of urban heat island and the increase of aerosols resulted by development of urban size and industrial activity.

Key words fog, decadal change, urban development, urban climate, aerosol

收稿日期 2007-06-07 收到, 2008-03-01 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40675002、40775010 和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开放课题 LAPC-KF-2003-03

作者简介 石春娥, 女, 1970年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事大气物理与大气化学的研究。E-mail: shichune@sina.com

1 引言

根据气象观测规范^[1]的定义,雾是指大量微小水滴悬浮空中,使水平能见度小于 1.0 km 的天气现象。最近的很多研究^[2~9]都表明,世界上很多地方雾的年发生率都在下降,尤其是城市地区。对城市雾发生率下降的原因,中外学者的看法不尽相同。有些学者^[2]把这种变化归因于城市气候和城市环境的变化,如城市热岛加强和空气中颗粒物减少;有些学者^[3,4,6]把这种变化归因于城市热岛加强和城市下垫面的改变,如植被减少、建筑物密度增加,同时城市范围扩大,这些都会导致空气湿度下降。有的学者认为大气气溶胶在雾的形成过程中起积极作用,例如, Sachweh 等^[3]认为是雾的阻碍因子(升热、降湿)作用超过了促进因子(大气气溶胶粒子增多和低风),从而导致城市雾发生率下降。也有学者^[4,6]认为大气气溶胶对近地层有增温作用从而对城市雾的形成有阻碍作用。虽然,大部分学者在讨论雾的气候变化时都简单分析了城市雾发生率下降的原因,但都不深入。本文利用安徽省 78 个测站近半个世纪的观测资料进行统计分析,研究了安徽雾的气候变化特征,同时通过对不同规模城市测站年雾日数的演变趋势及相关要素(如气温、相对湿度、能见度和燃煤量等)的对比分析,详细讨论了城市发展和大气气溶胶粒子对雾的影响。

2 资料来源

根据气象观测规范^[1]的定义,一个“雾日”定义为在一天中的任意时段观测到雾出现。考虑到安徽雾以辐射雾为主,一般形成于凌晨到上午 8 时之前,日出后逐渐消散^[10],而且在本文的统计中也发现出现间歇性雾的个例非常少。因此,在本文的统计中,如果一天中有多个时段出现雾,只要上一次雾消与下一次雾生之间的时间间隔不超过 1 h,则仍然记为一次“雾过程”,否则记为另一次“雾过程”。本文所用资料来自安徽省各市、县测站建站以来的逐日地面观测资料,除个别测站外,每一测站资料的

最小时间长度基本上都达到 40 年。安徽省的地面观测站为 81 个,相邻测站之间的平均距离为 29 km (6~63 km),考虑到黄山光明顶的测站海拔高度在 1 km 以上,观测到的雾基本上属于低云,本文不采用该站资料。九华山观测站建站时间较晚(建于 1991 年),南溪的观测资料仅到 1991 年,均将其剔除。

3 研究方法

在我国,几乎所有观测站都位于地级市或县城附近,所观测到的雾过程都或多或少地受到城市化的影响。为研究安徽雾的气候特征,计算年均雾日数的空间分布及最近 40 年的十年际变化趋势;为分析城市发展和大气气溶胶粒子对雾的影响,本文采用以下两种方法:

(1) 比较地级市及对应附近县城的年雾日数的变化趋势年际变化,目的是排除大尺度气候背景变化的影响;

(2) 计算典型城市雾过程有关参数(如雾的持续时间、生消时间等)以及有关气象要素(气温、湿度、能见度等)的年代际变化,目的是揭示城市年雾日数变化趋势的形成原因。

4 结果分析

4.1 安徽雾日数的空间分布特征

图 1 和 2 分别给出了 1966~2005 年年均雾日数分布和雾日数的季节分布。由图可以看出,安徽各地年均雾日数分布不均匀,存在多个高发区。最大的高发区为皖南山区,其次是江淮之间西部,以岳西、霍山为中心的大别山区,年均雾日数都在 30 天以上,部分测站的年均雾日数超过了 60 天。沿江和江北中部为低发区,年均雾日数在 15 天以下。总的来说,山区雾多,丘陵地区雾少,淮北平原居中。由图 2 可见,各地雾日数的季节分布并不一致。沿江到江北的丘陵和平原地区雾主要发生在秋、冬季节,以冬季为主,夏季最少;皖南山区部分测站(祁门、太平、黟县和旌德)雾主要发生在夏、秋季节(部分地方超过了年雾日数的 70%),大别山区(以岳西为代表)雾日数四季差别不大,冬季略低。

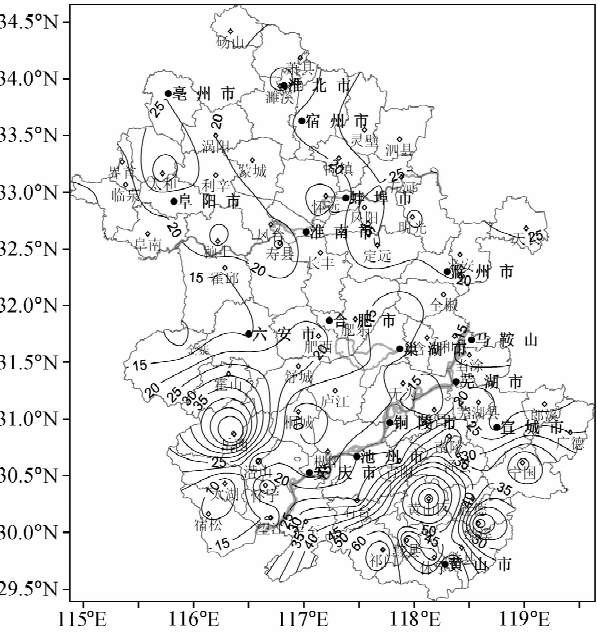


图 1 1966~2005 年安徽省年均雾日数水平分布 (单位: d; 空心方块表示县级测站, 实心圆表示地级市测站)
Fig.1 Spatial distribution of annual average fog frequencies during 1966—2005 (units: d; small squares denote county stations, solid circles denote urban stations)

4.2 年均雾日数的变化趋势

图 3 给出了最近 40 年 (1966~2005 年) 安徽省年均雾日数分布的十年际变化情况。由图可以看出, 大部分地区年均雾日数在以 1970 年为中心的 10 年最低, 以 1980 年为中心的 10 年最高, 也有部分测站以 1990 年或 2000 年为中心的 10 年最高。分别统计地级市和县级测站 4 个 10 年的年均雾日数发现, 大部分地级市 (11/17) 和近一半的县级测站 (29/61) 都在以 1980 年为中心的 10 年雾的发生率最高。地级市中, 亳州和巢湖在以 1990 年为中心的 10 年最高, 池州在以 2000 年为中心的 10 年最高。县级测站中有 14 个以 1990 年为中心的 10 年最高, 主要分布在沿江江南, 15 个在以 2000 年为中心的 10 年最高, 主要分布在淮河以北。总的来说, 上一个 10 年 (1986~1995 年), 以合肥为中心的江淮之间经济相对发达区, 年雾日数明显减少; 最近 10 年 (1996~2005 年), 皖南山区和江淮之间西部的大别山区年均雾日数都在下降。图 4 给出了全省 78 个测站平均年雾日数的演变趋势。由图可见, 1980 年之前全省平均雾日数呈上升趋势, 在 1980 年前后达到峰值, 之

后总体呈下降趋势。

绘制全省地级市年雾日数的年际变化曲线, 几乎所有城市的年雾日数都在 1970 年前后出现一个低谷。随后的变化趋势根据峰值出现时间可以分为两类 (图 5): 一类为先升后降型, 以 1980 年为中心的 10 年是雾发生率最高的 10 年, 之后, 雾的发生率出现明显的减少趋势。这类城市占大部分, 基本上都是建市较早, 发展较成熟的城市, 如合肥、芜湖和黄山市等。另一类城市虽也是先升后降型, 但下降的开始时间是 20 世纪 90 年代后期或 21 世纪初。这类城市比较少, 其建市时间基本上都是在 20 世纪 90 年代以后, 如亳州、巢湖、池州等。

通过上述比较发现, 不同发展阶段的城市, 年雾日数有不同的变化趋势。这种变化趋势是什么原因造成的, 是否是城市发展的影响? 下面探讨这个问题。

4.3 城市发展对雾的影响

研究城市化对局地气候影响最常用的方法是挑选城市和附近郊区观测站, 比较两地气候要素的时间序列^[3,11,12], 以排除大尺度气候变化的影响。本文也采用同样的方法来研究城市气候对雾的影响。鉴于我国的常规气象观测站基本都位于县城或地级市, 因而假定县级测站观测到的雾代表郊区的情况。图 6 给出了与图 5 对应的两类城市与其附近县城的年雾日数差 ($N_u - N_r$) 的演变情况, 图中, N_u 和 N_r 分别指城市和县城测站年雾日数, 与合肥比较的是肥东和肥西的平均, 与黄山比较的是歙县和休宁的平均, 与芜湖比较的是当涂和芜湖县的平均, 与池州比较的是青阳和枞阳的平均, 与巢湖比较的是无为和和县的平均, 与亳州比较的是涡阳。由图 6 可见, 在建市较早的几个城市, 如合肥、芜湖、黄山等, 自 1980 年以后, 总体趋势是下降的, 特别是合肥和芜湖, 自 1985 年以后, 雾日数明显小于郊区。这种变化趋势与图 5 一致, 这也与 Sachweh 等^[3] 给出的德国的例子类似。这说明城市发展导致了雾发生率下降。合肥市在建国后城市规模不断扩大, 特别是改革开放以后, 社会经济迅速发展, 城市范围和人口加速增长。例如, 城区面积在解放 (1949 年) 前仅为 5 km², 1980 年为 56 km², 1990 年也只有 69.5 km², 但 1990 年后, 城市规模迅速扩

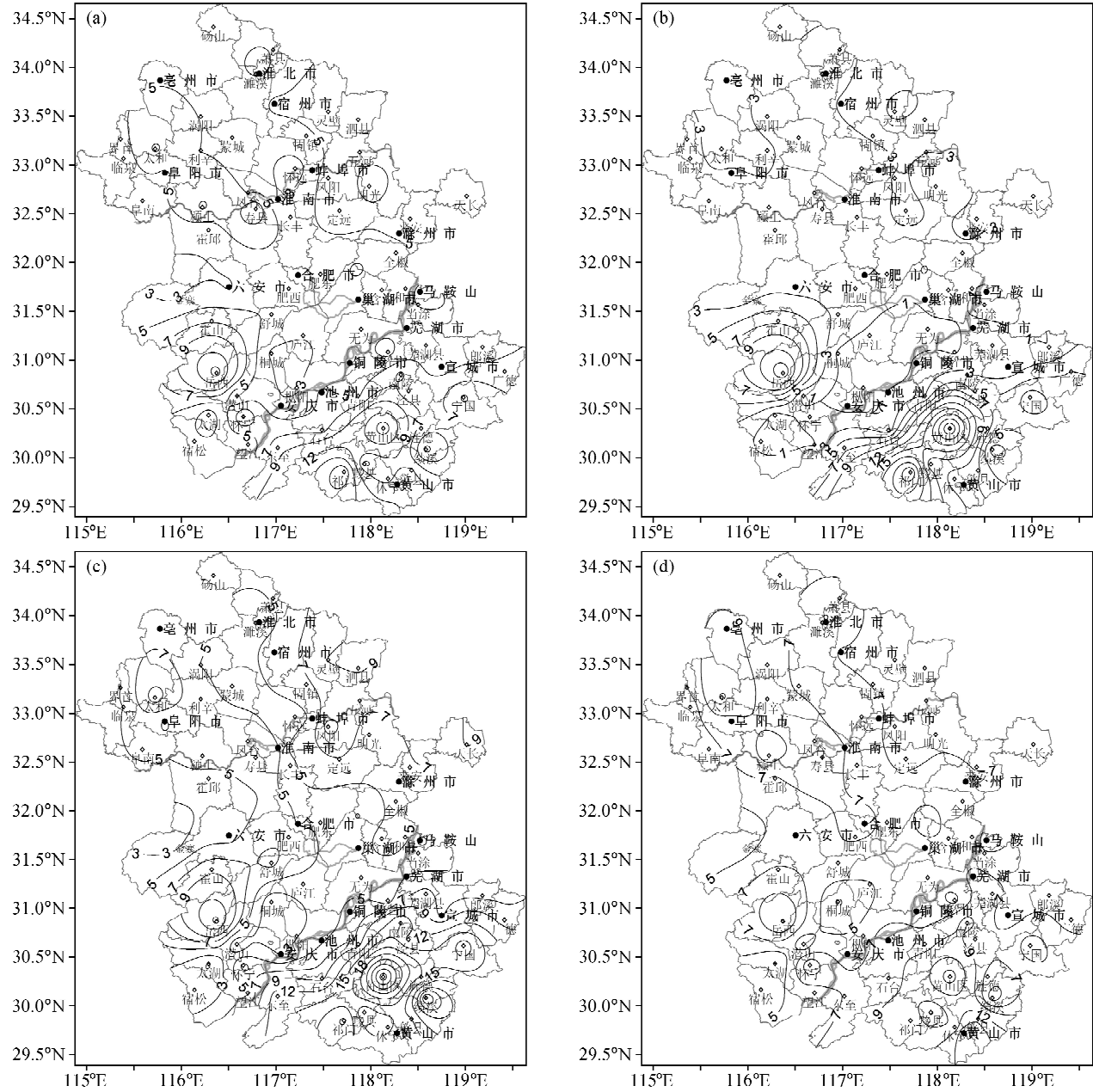


图2 1966~2005年雾日数的季节平均(单位:d): (a) 春季(3~5月); (b) 夏季(6~8月); (c) 秋季(9~11月); (d) 冬季(12月~次年2月)
Fig.2 Spatial distributions of seasonal average of fog occurrence (units: d): (a) spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

大,到2000年城区面积已达到125 km²,2005年达225 km²;人口在解放前后约6万,1980年增长为51.8万,2005年猛增到150万,进入大城市的行列。正是由于20世纪80年代以后这种突飞猛进的发展,导致了城市雾日明显减少。对建市较晚的几个地级城市,如亳州、池州和巢湖等,从20世纪70或80年代开始,年雾日数都有上升趋势,但在1995年以后,年雾日数明显下降。这

些城市原是县城,是在20世纪90年代以后建市的,建市之前经济发展缓慢,建市以后社会经济迅速发展,城市人口迅猛增加。如亳州市,1978年城区面积仅5.5 km²,人口6.2万,建市以后,城市规模迅速发展,2004年城区面积超过30 km²,人口接近30万。可见在城市缓慢发展时期,雾日数逐渐增加,但在城市规模明显扩大之后,雾日数开始下降。

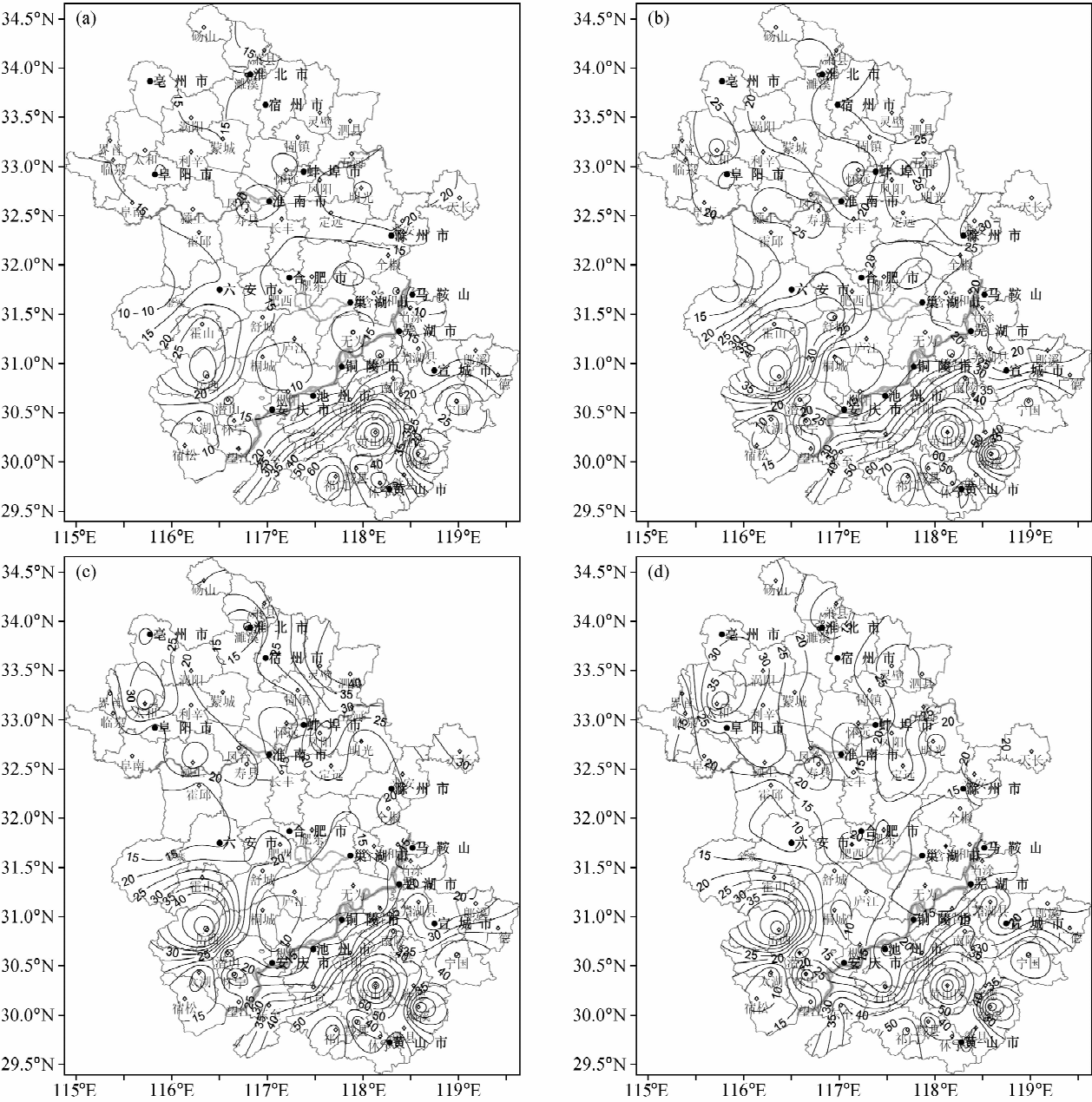


图 3 1966~2005 年安徽雾日数的 10 年际平均分布 (单位: d): (a) 1966~1975 年; (b) 1976~1985 年; (c) 1986~1995 年; (d) 1996~2005 年 (小于 40 天等值线间隔为 5, 大于 40 天等值线间隔为 10)

Fig. 3 Distributions of decadal average of fog days in Anhui Province (units: d): (a) 1966—1975; (b) 1976—1985; (c) 1986—1995; (d) 1996—2005 (intervals are 5 and 10 under/over value of 40, respectively)

城市发展使雾减少的直接原因是, 城市规模扩大后, 气温上升, 相对湿度明显减小。本文统计了安徽各地级市的有关地面气象要素, 发现最近 30 年各市气温都上升明显, 尤其是 2 时气温和最低气温; 相对湿度下降, 水汽压和绝对湿度变化不大, 最近 10 年甚至略有上升, 能见度普遍下降。表 1 给出了 1966~2005 年合肥和亳州有关气

象要素的十年际变化情况。由表 1 可见, 从以 1970 年为中心的 10 年到 2000 年为中心的 10 年, 两市 2 时气温和最低气温都呈加速上升趋势, 1996~2005 年平均和 1966~1975 年平均相比, 合肥 2 时和最低气温的上升幅度都超过 1.2℃, 亳州超过 1.3℃; 合肥的相对湿度在 1976~1985 年最高, 这也是雾日数最高的 10 年, 随后一直在下

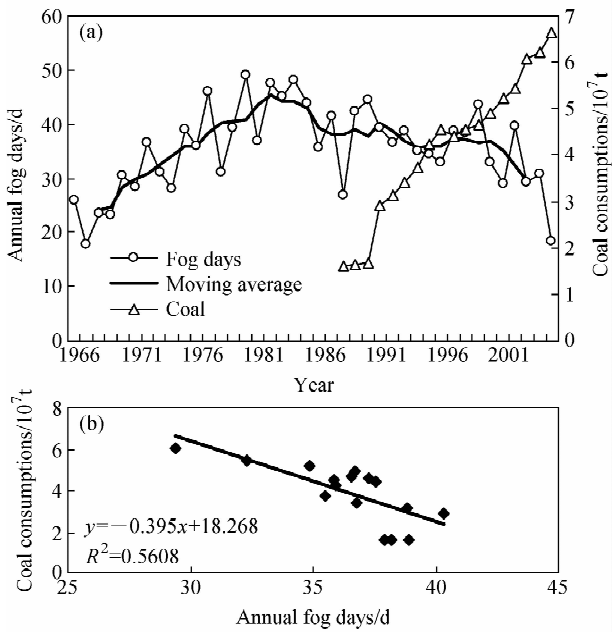


图4 安徽省 (a) 平均雾日数与煤耗量的变化趋势和 (b) 煤耗量与雾日数的对比

Fig.4 Variations of averaged annual fog days and coal consumptions (a) and comparison between fog days and coal consumptions (b)

降,因而雾日数明显减小。亳州平均相对湿度最大的10年在1986~1995年,也对应着平均年雾日数最高的10年;1996~2005年平均相对湿度与1976~1985年相比,2时下降约3%,因而,城市雾发生率明显下降。虽然两市的相对湿度在最近30年都明显下降,几乎与年雾日数存在相同的变化趋势,但绝对湿度的变化不大,且近10年与上一个10年相比,两市的绝对湿度都略有上升,可见雾日数的变化主要是由城市热岛引起的。

上述城市气温的变化,除大尺度气象背景影响之外,城市发展是个重要因素。城市规模扩大,人口增加,社会经济发展,煤炭等能源消耗增多,直接导致城市热岛增强,相对湿度下降。

4.4 大气气溶胶粒子对雾的影响

城市发展不仅使城市热岛增强,而且由于煤炭等能源消耗增多和汽车保有量增多,直接导致大气中颗粒物明显增多。大气气溶胶粒子增多,一方面作为凝结核,有利于雾滴形成;另一方面由于大气气溶胶粒子对辐射传输的影响,城市上空的大气气溶胶粒子在夜晚形成“雾障”,笼罩在城市上空,增加大气逆辐射,不利于地表和近地

层降温,有助于加剧夜间城市热岛效应^[13,14],从而可以阻碍城市雾的形成^[15]。白天存在明显的“阳伞效应”,使城市白天气温下降^[16,17],从而延缓雾的消散。因此,大气气溶胶对雾的作用存在两个互相矛盾的方面,“促进”和“阻碍”。

对城市大气气溶胶粒子明显增多现象,虽无大气气溶胶粒子连续观测资料来直接证明,但由城市大气能见度变坏可以得到间接依据,因为大气能见度的好坏与大气中气溶胶粒子多少直接相关。近年来许多研究^[18~21]表明,大气中颗粒物浓度与大气能见度之间存在非常明显的负相关关系。另外,燃煤量的增加也能说明大气气溶胶粒子的增多,因为燃煤量直接反映大气颗粒物的工业排放量。为避免雾和相对湿度的影响,本文用14时大气能见度的变化趋势来表征大气气溶胶数浓度的变化趋势(表1)。由表1可见,合肥能见度一直在下降,尤其是最近20年,1996~2005年平均和1976~1985年平均相比,下降约30%。亳州能见度的变化趋势与合肥略有不同,平均能见度最大的10年为1986~1995年,1996~2005年平均与1986~1995年平均相比,下降约20%。能见度的变化趋势表明,城市迅速发展,使大气中气溶胶粒子数浓度显著上升。图4和7给出了1988~2005年安徽省逐年的燃煤总量^[22],由图可见,1990年之前,安徽省燃煤总量维持在一个比较低的水平,1990年之后迅速上升,其趋势与合肥雾中能见度和安徽省平均雾日数的发展趋势正好相反。图4还给出了平滑后的全省平均雾日数与煤耗量的点聚图,可以看出,1985年之后,全省平均雾日数与煤耗量之间存在显著的反相关。这表明1990年之后向大气中排放的颗粒物迅速增加,直接导致大气能见度大幅度下降(见表1)和全省雾日数减少。

大气中气溶胶粒子数浓度增大,也使雾中能见度下降。图7同时给出了1985年以来合肥8时雾中能见度变化趋势,由图可见,总体雾中的能见度呈减小趋势。这是由于空气中颗粒物增多,雾滴数浓度增加,以及快速城市化带来的污染气体增多,都可造成雾中能见度下降^[4]。

由于雾中能见度变坏,以及气溶胶粒子增多引起的白天“阳伞效应”,都影响雾的消散。图8给出了合肥和亳州雾的生消时间,图9给出了部分城市雾的持续时间的十年际变化。由图8可见,

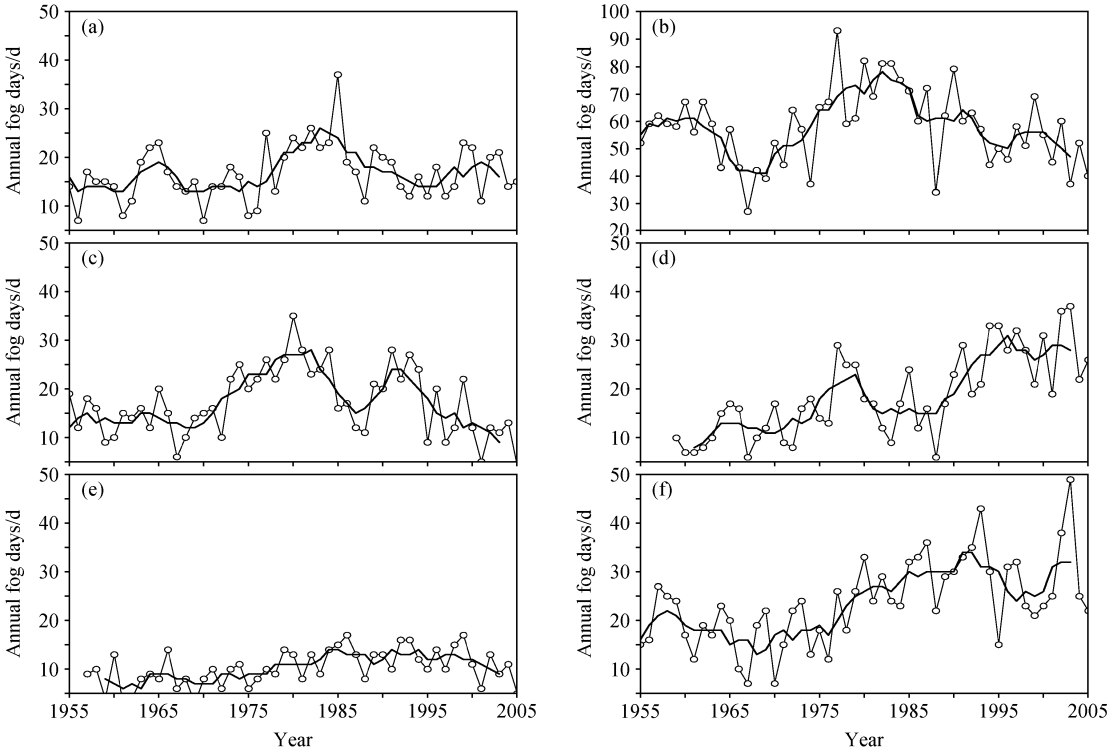


图 5 两类城市测站年雾日数的变化趋势（粗实线为 5 年滑动平均，细实线带空心圆为逐年雾日数）：(a) 合肥；(b) 黄山；(c) 芜湖；(d) 池州；(e) 巢湖；(f) 亳州

Fig. 5 Trends of annual fog events at urban stations (solid line denotes 5-year moving average, fine solid line denotes the annual fog days): (a) Hefei; (b) Huangshan; (c) Wuhu; (d) Chizhou; (e) Chaoahu; (f) Bozhou

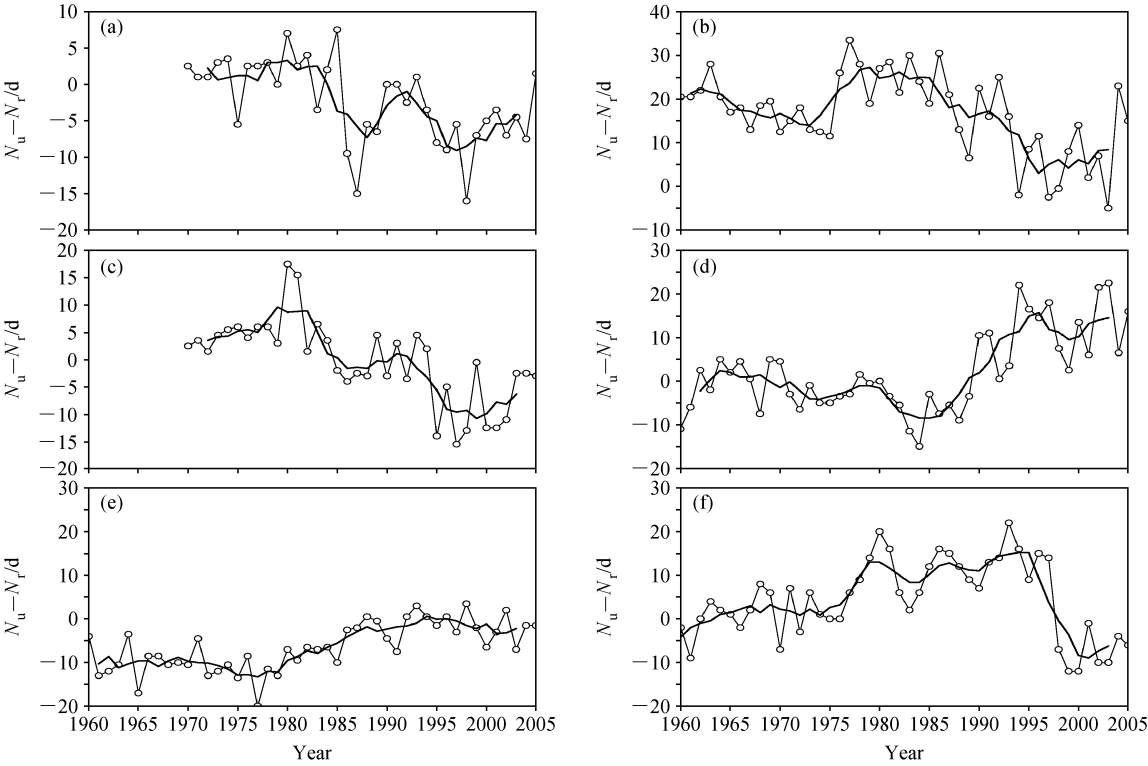


图 6 年雾日数城 (N_u) 郊 (N_r) 差异的逐年变化（粗实线为 5 年滑动平均，细实线加空心圆为逐年雾日数差别）：(a) 合肥；(b) 黄山；(c) 芜湖；(d) 池州；(e) 巢湖；(f) 亳州

Fig. 6 Annual differences of fog days at typical urban stations (N_u) and its surroundings (N_r) (solid line denotes 5-year running mean, fine solid line denotes the annual fog days difference): (a) Hefei; (b) Huangshan; (c) Wuhu; (d) Chizhou; (e) Chaoahu; (f) Bozhou

表 1 合肥和亳州 1966~2005 年十年际平均气象要素

Table 1 Decadal average of meteorological parameters at Hefei and Bozhou during the past 40 years

城市	年份	2 时气温/℃	最低气温/℃	8 时绝对湿度/ g · m ⁻³	8 时相对湿度/%	14 时能见度/km	平均雾日数/d
合肥	1966~1975 年	13.56	11.85	11.67	82.78	14.13	13.6
	1976~1985 年	13.61	11.96	11.63	84.01	14.12	22.1
	1986~1995 年	14.07	12.33	11.57	83.14	13.65	16.2
	1996~2005 年	14.78	13.06	11.93	82.70	10.48	17.0
亳州	1966~1975 年	11.78	9.72	10.36	79.54	19.69	15.7
	1976~1985 年	11.86	9.85	10.38	80.61	20.63	24.7
	1986~1995 年	12.02	10.08	10.41	80.76	22.95	30.6
	1996~2005 年	13.15	11.27	10.66	79.03	18.56	28.9

注：所用时间为北京时间（下同）

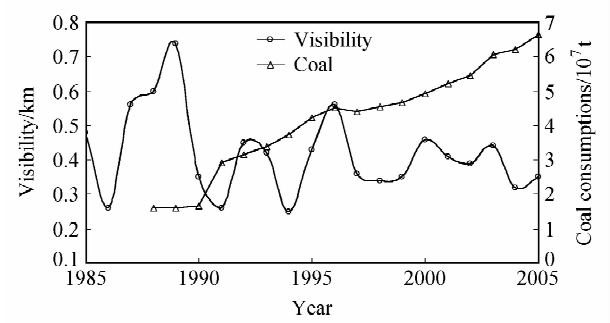


图 7 合肥 8 时雾中能见度和燃煤量的变化
Fig. 7 Variation of annual average of visibilities within fog at 0800 LST and coal consumptions

合肥雾的开始时间以 5 和 6 时为主，最近 30 年，由于年均雾日数在下降，每个时次雾的产生次数都在下降，但雾生的峰值时间没有变化。从雾消时间的分布图上可以看出，最近 30 年，合肥和亳州等城市雾消的峰值时间都在向后推移，因而合肥、亳州雾的持续时间都在延长（图 9），尤其是最近 10 年，雾的持续时间增加十分明显。

5 结论和讨论

（1）安徽山区雾多，丘陵地区雾少，淮北平

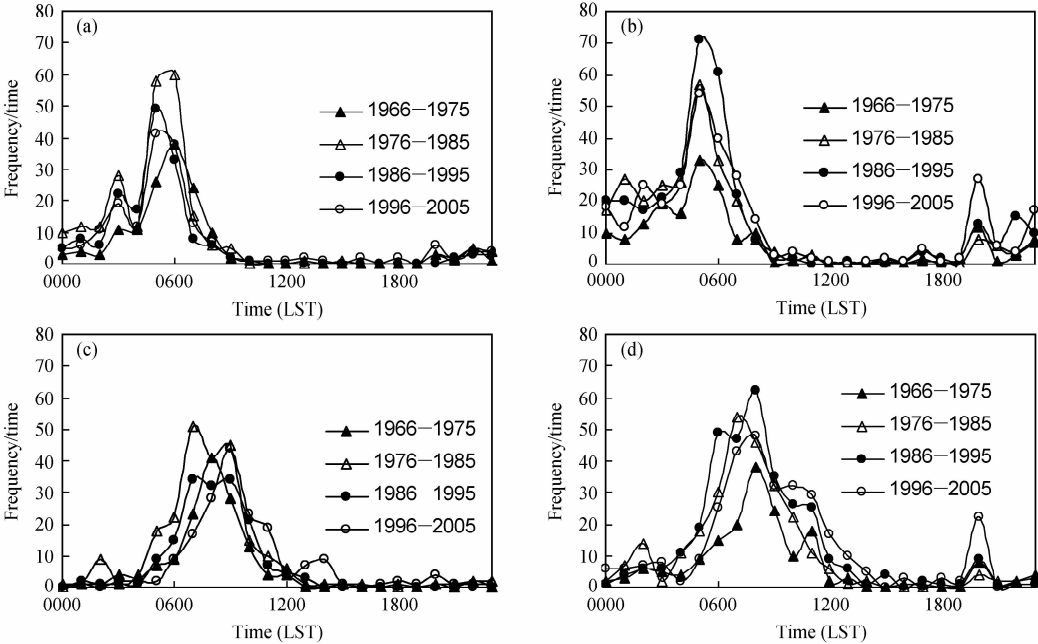


图 8 不同年代雾的生消时间：（a）合肥，雾生；（b）亳州，雾生；（c）合肥，雾消；（d）亳州，雾消
Fig. 8 Beginning and ending time distribution of fog at different decadal period: (a) Hefei, fog formation; (b) Bozhou, fog formation; (c) Hefei, fog dissipation; (d) Bozhou, fog dissipation

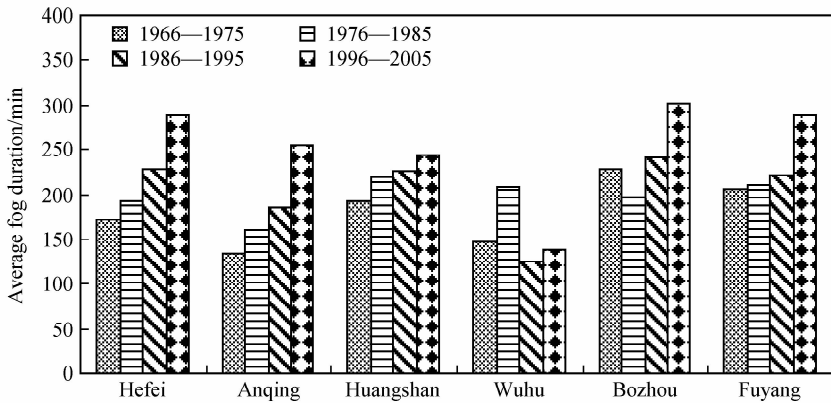


图9 不同年代雾平均持续时间

Fig. 9 Decadal average of fog duration

原居中。皖南山区是最大的高发区，大部分测站年雾日数都超过 30 次/年；沿江到江淮之间中部为低发区，低于 15 次/年。不同地区雾的高发季节不同，丘陵和平原地区雾的高发季节为秋冬季，大别山区雾发生率四季差别不大，皖南山区雾的高发季节为夏秋季。

(2) 以 1980 年为中心的 10 年是安徽雾，尤其是城市雾的年均发生率最高的 10 年，随后普遍下降，但也有个别地级市和部分县级测站雾的发生率在持续上升。20 世纪 60 年代以来大部分城市雾发生率都是先升后降，以 80 年代或 90 年代为峰值时间。

(3) 在城市的不同发展阶段，城市气候、人类活动对雾的影响不同。在城市发展初期，城市发展对雾的形成有促进作用。当城市发展到一定的规模后，城市热岛加强以及气溶胶粒子对辐射传输的影响都会阻碍雾的形成。

(4) 大气气溶胶粒子的增多直接影响辐射传输，使雾的消散时间推后，持续时间延长；凝结核增加，雾滴数浓度增加，使雾内能见度下降。

(5) 从本文统计分析的结果看，燃煤量与雾中能见度和平均雾日数之间都存在显著的反相关，由此推测安徽城市雾下降的原因可能是城市热岛加强和大气气溶胶粒子增多共同作用的结果。但要从理论上揭示城市雾发生率下降的原因，还必须发展具有详细微物理过程的雾模式，即模式中既能考虑气溶胶粒子核化作用又能考虑其对辐射传输的影响。

致谢 感谢南京信息工程大学的李子华教授和不知名的评审专家对本文所给予的有益建议！

参考文献 (References)

- [1] 中国气象局. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 2003. 21~27
Chinese Meteorological Administration. *Surface Meteorology Observation Criteria* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2003. 21~27
- [2] Steve L. The disappearance of dense fog in Los Angeles: Another urban impact? *Physical Geography*, 2005, **26** (3): 177~191
- [3] Sachweh M, Kocpkc P. Radiation fog and urban climate. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22** (9): 1073~1076
- [4] 李子华. 中国近 40 年来雾的研究. 气象学报, 2001, **59** (5): 616~624
Li Zihua. Studies of fog in China over the past 40 years. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (5): 616~624
- [5] 王丽萍, 陈少勇, 董安祥. 中国雾区的分布及其季节变化. 地理学报, 2004, **60** (4): 689~697
Wang Liping, Chen Shaoyong, Dong Anxiang. The distribution and seasonal variations of fog in China. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2004, **60** (4): 689~697
- [6] 刘小宁, 张洪政, 李庆祥, 等. 我国大雾的气候特征及变化初步解释. 应用气象学报, 2005, **16** (2): 220~271
Liu Xiaoning, Zhang Hongzheng, Li Qingxiang, et al. Preliminary research on the climatic characteristics and change of fog in China. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2005, **16** (2): 220~271
- [7] 贺浩, 吕红, 徐红. 陕西省大雾的气候特征. 高原气象, 2004, **23** (3): 407~411
He Hao, Lu Hong, Xu Hong. Climatic characteristics of

- heavy fog in Shaanxi Province. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (3): 407~411
- [8] 周自江, 朱燕君, 姚志国, 等. 四川盆地区域性浓雾序列及其年际和年代际变化. *应用气象学报*, 2006, **17** (5): 567~573
Zhou Zijiang, Zhu Yanjun, Yao Zhiguo, et al. Regional dense fog time sequence with its annual and decadal variation in the Sichuan basin. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2006, **17** (5): 567~573
- [9] 周自江, 朱燕君, 鞠晓慧. 长江三角洲地区的浓雾事件及其气候特征. *自然科学进展*, 2007, **17** (1): 66~71
Zhou Zijiang, Zhu Yanjun, Ju Xiaohui. Dense fog events and its climatic characteristics over Yangtze delta. *Advances in Natural Sciences* (in Chinese), 2007, **17** (1): 66~71
- [10] 陈晓红, 方翀. 安徽省县级大雾预报业务系统. *气象*, 2005, **31** (4): 60~64
Chen Xiaohong, Fang Chong. An operational forecast system of dense fog for counties in Anhui Province. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2005, **31** (4): 60~64
- [11] 石春娥, 王兴荣, 马晓群, 等. 一种研究城市发展对局地气候要素影响的新方法及其应用. *气象学报*, 2000, **58** (3): 368~375
Shi Chune, Wang Xingrong, Ma Xiaoqun, et al. A novel method for studying the urbanization on local climate elements and its application. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58** (3): 368~375
- [12] 陈沈斌, 潘莉卿. 城市化对北京平均气温的影响. *地理学报*, 1997, **52** (2): 7~36
Chen Shenbin, Pan Liqing. Urbanization effect on mean temperature of Beijing city. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1997, **52** (2): 7~36
- [13] 石春娥, 王兴荣, 吴必文, 等. 合肥市夏季热岛特征研究. *南京气象学院学报*, 2005, **28** (5): 672~678
Shi Chune, Wang Xingrong, Wu Biwen, et al. A study on the summer characteristics of urban heat island in Hefei. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2005, **28** (5): 672~678
- [14] 李子华, 涂晓萍. 考虑湿度影响的城市气溶胶夜晚温度效应. *大气科学*, 1996, **20** (3): 359~366
Li Zihua, Tu Xiaoping. The influence of urban aerosols with humidity effect on temperature during night. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1996, **20** (3): 359~366
- [15] 石春娥, 姚克亚, 马力. 气溶胶粒子对城市雾影响的模拟研究. *气候与环境研究*, 2001, **6** (4): 485~492
Shi Chune, Yao Keya, Ma Li. Numerical studies of effects of aerosols on urban fog. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (4): 485~492
- [16] Chen Longxun, Zhu Wenqin, Zhou Xiuji, et al. Characteristics of heat island effect in Shanghai and its possible mechanism. *Advances in Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **20** (6): 991~1001
- [17] 李子华, 杨军, 黄世鸿. 考虑湿度影响的城市气溶胶粒子白天温度效应. *大气科学*, 2000, **24** (1): 256~263
Li Zihua, Yang Jun, Huang Shihong. Influence of urban aerosols with humidity effect on temperature during daytime. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, **24** (1): 256~263
- [18] 王淑英, 张小玲, 徐晓峰. 北京地区大气能见度变化规律及影响因子统计分析. *气象科技*, 2003, **31** (2): 109~114
Wang Shuying, Zhang Xiaoling, Xu Xiaofeng. Analysis of variation features of visibility and its effect factors in Beijing. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2003, **31** (2): 109~114
- [19] 宋宇, 唐孝炎, 张远航, 等. 北京市大气能见度规律及下降原因. *环境科学研究*, 2003, **16** (2): 10~12
Song Yu, Tang Xiaoyan, Zhang Yuanhang, et al. The study of the status and degradation of visibility in Beijing. *Research of Environment Sciences* (in Chinese), 2003, **16** (2): 10~12
- [20] 徐鹏炜, 谭湘萍, 蔡菊珍, 等. 杭州城市大气消光系数和能见度的影响因子研究. *环境污染与防治*, 2005, **27** (6): 410~413
Xu Pengwei, Tan Xiangping, Cai Juzhen, et al. Study on influence factors of urban aerosol on visibility and extinction coefficient. *Environment Pollution and Protection* (in Chinese), 2005, **27** (6): 410~413
- [21] 马雁军, 左洪超, 张云海, 等. 辽宁中部城市群大气能见度变化趋势及影响因子分析. *高原气象*, 2005, **27** (4): 623~628
Ma Yanjun, Zuo Hongchao, Zhang Yunhai, et al. Analysis on variation trends of atmospheric visibility and its effect factor in multi-cities in central Liaoning. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24** (4): 623~628
- [22] 安徽省统计局. *安徽省统计年鉴*. 北京: 中国统计出版社, 2006. 183pp
Statistic Bureau of Anhui Province. *Anhui Statistical Yearbook* (in Chinese). Beijing: China Statistics Press, 2006. 183pp