

张恩红,朱彬,曹云昌,等. 长江三角洲地区近 30 年非雾天能见度特征分析[J]. 气象,2012,38(8):943-949.

# 长江三角洲地区近 30 年非雾天能见度特征分析<sup>\* 1</sup>

张恩红<sup>1,2</sup> 朱 彬<sup>1</sup> 曹云昌<sup>2</sup> 王红磊<sup>1</sup>

1 南京信息工程大学,中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室,南京 210044  
2 中国气象局气象探测中心,北京 100081

**提 要:** 利用地面能见度观测数据和中分辨率成像光谱仪(简称 MODIS)所提供的气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)资料,分析了中国长江三角洲地区近 30 年的能见度变化特征。结果表明,该地区 1980—2009 年能见度年均值为  $19.5 \pm 1.8$  km,其中最高值为 21.9 km,在 1984 年,最低值为 16.1 km 在 2007 年。近 30 年能见度呈下降趋势,平均年递减率为  $-0.20 \pm 0.013$  km/a,近几年能见度趋于稳定。该地区能见度:夏季能见度最好,秋、春季次之,冬季最差;沿海地区能见度好于内陆地区,沿江(河)两岸能见度较差,沿江(河、海)地区能见度的下降速度大于其他地区,在浙江东南部沿海地区尤为明显。利用 EOF 方法分析长三角地区能见度,结果表明第一模态的特征向量均为正值,说明全区能见度均呈下降趋势。利用 MODIS AOD 数据分析区域性及长期能见度变化趋势与利用地面观测数据方法分析结论相一致。

**关键词:** 能见度,气溶胶光学厚度(AOD),经验正交函数 EOF,长江三角洲地区

## Analysis of the Visibility Change in the Yangtze River Delta Region in Recent 30 Years

ZHANG Enhong<sup>1,2</sup> ZHU Bin<sup>1</sup> CAO Yunchang<sup>2</sup> WANG Honglei<sup>1</sup>

1 Key Laboratory for Atmospheric Physics and Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044  
2 Meteorological Observation Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081

**Abstract:** The visibility change was analyzed with the observations from ground stations and the aerosol optical depth (AOD) data from Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) in the Yangtze River Delta region in recent 30 years. It shows that the annual mean visibility was  $19.5 \pm 1.8$  km during 1980—2009 with a maximum value of 21.9 km in 1984 and a minimum value of 16.1 km in 2007. The visibility has a downward trend in recent 30 years at a rate of  $-0.20 \pm 0.013$  km/a and tends to become stable in the last few years. The visibility changes with the seasons in this region which is the highest in summer, followed by autumn and spring and the lowest in winter; the visibility in the coastal areas is higher than that in inland, and it is lower along the rivers; the decreasing rate along the rivers and the coast areas is higher, especially in the southeastern Zhejiang. The EOF method was used to analyze the visibility of the Yangtze River Delta region. The result shows that the eigenvectors of the first mode are all positive, indicating the decreasing trend of the visibility in the whole region. The analysis on the regional and long-term visibility change made by the MODIS AOD data coincides with that by the ground station observations.

**Key words:** visibility, aerosol optical depth (AOD), empirical orthogonal function (EOF), the Yangtze River Delta region

<sup>\*</sup> “973”项目(2009CB426313)、国家自然科学基金重点项目(41030962)、教育部博士点基金(20093228110003)及江苏省高校“青蓝工程”和江苏省优势学科建设工程(PAPD)共同资助  
2011 年 9 月 20 日收稿; 2012 年 2 月 20 日收修定稿  
第一作者: 张恩红,主要研究方向为大气环境与大气化学. Email:godson0403@sohu.com  
通信作者: 朱彬,主要从事大气化学与大气环境、大气成分气候相互作用研究. Email: binzhu@nuist.edu.cn

## 引 言

能见度是指视力正常的人在当时天气条件下从天空背景中看到和辨认出黑色、大小适度的目标物的最大水平距离,夜间则指能看到和确定出一定强度灯光的最大水平距离<sup>[1]</sup>。能见度作为大气环境的一个重要物理参数,通常被视为反映大气环境质量好坏的指标之一<sup>[2]</sup>。长江三角洲地区(简称长三角地区,在本文中包括上海市、江苏省、浙江省和安徽省)作为中国经济和工业快速发展的地区之一,近 30 年来能见度发生了较大变化,对该地区的经济发展和人民生活产生较大影响。该地区大气能见度对该地区能见度的预测预报及天气变化的研究<sup>[3-4]</sup>,对保证该地区交通安全、保障经济持续发展及提高人民生活质量有重大意义。

20 世纪初,能见度变化特征与成因受到国内外学者的重视。Vinzani 等<sup>[5]</sup>发现伊里诺斯州能见度存在明显的季节变化;Naegele 等<sup>[6]</sup>认为 1958—1978 年美国西部和西南部的能见度在 1973 年执行空气改善政策之前逐年降低,之后则逐年增加;Miller 等<sup>[7]</sup>发现美国俄亥俄州、肯塔基州和田纳西州 1966—1969 年的能见度比 1962—1965 年间要好。王淑英等<sup>[8]</sup>也发现 1990—2000 年北京地区大气能见度存在明显的年际变化、季节变化和日变化;范引琪等<sup>[9]</sup>发现河北省 1960—2002 年城市大气能见度显著下降,指出在这 43 年中,由于空气污染使得城市的夏季能见度下降的幅度最大;Li<sup>[10]</sup>分析了 1951—2006 年桂林的能见度变化,在 20 世纪 50 年代有所上升,从 60 年代以后开始降低。钱峻屏等<sup>[11]</sup>使用 MODIS 观测资料发现能见度与辐射值呈负相关;赵秀娟等<sup>[12]</sup>研究了光学厚度与能见度的关系,发现两者的变化趋势相反,光学厚度与能见度之间近似呈指数递减关系。毕凯等<sup>[13]</sup>认为霾或雾在演变的各阶段气溶胶吸湿性增长且消光系数随相对湿度变化。伍红雨等<sup>[14]</sup>研究表明年霾日长期变化趋势有明显的空间差异。魏文秀<sup>[15]</sup>分析了河北省霾天数据记录可知霾的出现与天气形势有关,霾频数大小与空气污染程度和地形联系密切。

近年来,长三角地区(包括江苏省、浙江省、安徽省和上海市的全部地区)随着工业、交通、物流和旅游等行业的迅速发展,能见度变化对经济社会的影响加大。但当前针对长三角地区能见度变化的研究

很少<sup>[16]</sup>。所以研究长三角地区能见度变化具有重大的应用价值。

## 1 资料来源与分析方法

### 1.1 数据来源

本研究选取长三角地区 1980—2009 年 58 个国家级气候基准站和气象基本站常规能见度观测资料。站点分布如图 1 所示。

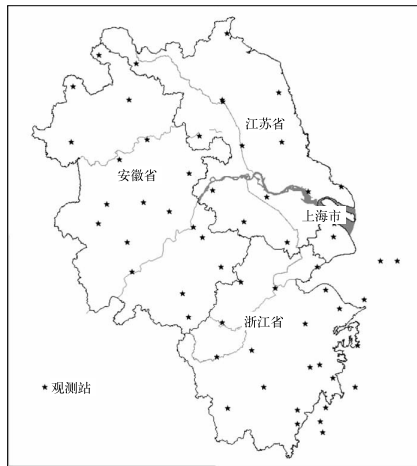


图 1 长三角地区 58 个国家级观测站分布示意图

Fig. 1 The distribution of 58 national-level observational stations in the Yangtze River Delta region

另选取 MODIS AOD 月平均值产品(下载地址: <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>),分辨率  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ,经纬度范围  $27^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$  和  $114^{\circ} \sim 124^{\circ} \text{E}$ ,时间跨度 2000—2009 年。

本文中使用的年平均值是指一个年度所有符合要求的数据的算术平均值,月平均值是指 1980—2009 年同月份中所有符合要求的数据年算术平均值。单站平均能见度是指该站 1980—2009 年所有符合要求的数据的算术平均值。

### 1.2 数据预处理

不考虑天气变化对能见度的影响,本文仅研究霾对能见度的影响,这可反映大气质量对能见度的影响。目前国内外对雾与霾的分界相对湿度值定义差异较大,英国定义 80% 为雾和霾的分界相对湿

度<sup>[17]</sup>,美国则用 90%为雾和霾的分界相对湿度<sup>[17]</sup>。但如何去除雾天的能见度,需要对雾和霾分别做出定义,本文通过分析,选取相对湿度 85%作为雾霾的区分。杨军等<sup>[18]</sup>在研究相对湿度对大气气溶胶粒子短波辐射特性的影响时,认为在不同的相对湿度下消光系数变化时,相对湿度为 95%时的消光系数是相对湿度为 85%时消光系数的两倍,而在 85%以下的不同相对湿度值时,消光系数变化则不是很明显,这和本文选取标准相一致。

1.3 研究方法

经验正交函数(EOF)分析是大气科学领域常用的时空分析方法。它既能保留原始数据提供的绝大部分信息,又能起降维作用,有效浓缩空间场信息。第一特征向量反映了能见度场的平均状态,其余特征向量反映了能见度场的不同尺度的变化平均状态,相应的时间系数作为特征向量的权重反映了不同年份对这种分布的贡献大小<sup>[19]</sup>。

根据前文分析要求,下文中选取每天 14 时地面观测站数据,去除相对湿度大于 85%的部分数据。在所用 58 个观测站中,由于站点迁移等原因造成持续观测的时间长度不一致。因此,在同一年有观测记录的站为 49~53 个,EOF 分析使用了其中 46 个数据较完整的台站数据样本。

2 能见度变化特征

2.1 年季变化特征

本文对该地区 58 个站年平均能见度进行统计,分析结果见图 2,发现 1980—2009 年长三角地区能见度逐年降低,平均年递减率约  $-0.20 \pm 0.013 \text{ km} \cdot \text{a}^{-1}$ ,能见度值与年份相关系数为  $-0.94$ 。能见度最大值出现在 1984 年,达 21.9 km;最小值出现在 2007 年,仅为 16.1 km。20 世纪 80 年代能见度呈波动变化,平均年变化率为  $0.02 \text{ km} \cdot \text{a}^{-1}$ ;90 年代下降趋势加大,平均年变化率为  $-0.33 \text{ km} \cdot \text{a}^{-1}$ ,最大年降幅 1995—1996 年达 1.2 km;2000 年开始,能见度呈波动性降低,年递减率为  $-0.16 \text{ km} \cdot \text{a}^{-1}$ ;近几年能见度出现好转,其中 2008 年的平均值比 2007 年的平均值高出 0.85 km。范引琪等<sup>[9]</sup>在河北省城市大气能见度变化研究中也发现类似的变化规律。

长三角地区气候季节变化明显,受气候影响,该地区季节能见度也有很明显的变化。不同季节的能见度变化结果如图 3 所示。四个季节的能见度变化总趋势和年平均能见度变化趋势一致,都是逐年下降,但四个季度间的能见度有显著差异,表现为夏季最好,冬季最差,春秋季介于期间。夏季能见度平均为  $21.5 \pm 2.2 \text{ km}$ ,冬季平均值为  $17.1 \pm 1.3 \text{ km}$ ,夏季能见度平均比冬季高 4.5 km。近年来能见度下降逐渐趋缓,2007—2008 年,各季能见度甚至增大;在 20 世纪 80—90 年代,四季能见度差异明显,平均能见度秋天比夏天大 1.2 km,2000 年以后,四季能见度差异逐渐变小,且四个季节的能见度变化趋势变得复杂。夏、秋季能见度下降速度较大,冬、春能见度下降相对较慢,导致春、夏、秋、冬的能见度差异

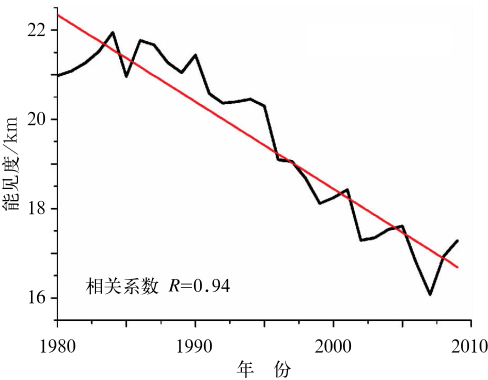


图 2 长江三角洲地区 1980—2009 年能见度年平均值变化曲线

Fig. 2 The variation curve of annual mean visibility during 1980—2009

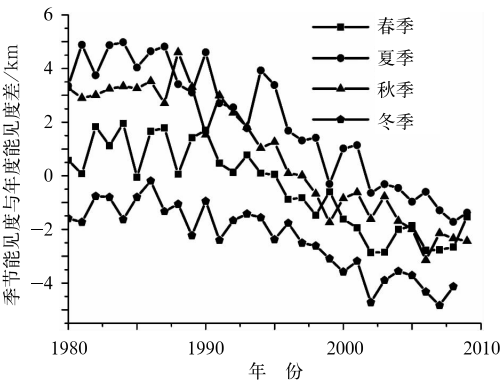


图 3 1980—2009 年能见度不同季度变化趋势曲线  
(年平均值  $19.5 \pm 1.8 \text{ km}$ )

Fig. 3 The visibility variation trend of different seasons during 1980—2009  
(annual mean visibility  $19.5 \pm 1.8 \text{ km}$ )

变小。由前文数据分析可知,春季和冬季年平均变化率分别是 $-0.15$ 和 $-0.13\text{ km}\cdot\text{a}^{-1}$ ,夏季和秋季的年平均变化率分别是 $-0.23$ 和 $-0.24\text{ km}\cdot\text{a}^{-1}$ ,该地区能见度月变化显著,7月能见度最高,1和12月能见度最低(图略)。上述结果的可能成因在于受到副热带高压气候和季风气候的影响,长三角地区的夏天晴天多、日照长、降雨量大,大气清洁能见度好,而冬天晴天少、日照短、降雨量少,大气层结相对稳定,空气的污染很难清除,易于底层大气中气溶胶粒子富集,容易形成霾天气,能见度受到很大的影响。

2.2 地域时空变化特征

为了分析长三角地区能见度区域分布特征,本文根据长三角地区 58 个站的能见度观测资料,统计了各台站的平均能见度值,得到区域能见度等值线分布如图 4 所示,从图中可看出,沿海地区能见度好于内陆地区,经济欠发达的皖北地区能见度好于皖南地区。安徽中部地区、相邻的江苏西南部地区、浙江东北部地区 and 上海能见度都较差,这些地区都是工业相对集中的区域,工业污染严重。而黄山地区和浙江的舟山群岛地区受工业污染较小,能见度最好。

从数据分析结果可以看出沿海地区、苏北、皖北及皖南和浙北交界地区能见度比全区平均能见度好,而在内陆地区能见度都比全区能见度差,尤其是沿河一带站点能见度下降更为明显。其中,能见度

最低的蚌埠(比平均值低 6.7 km)、杭州(比平均值低 6.3 km)、衢州(比平均值低 5.7 km)都在沿河区域,这一现象主要可能是由于沿河两岸的经济发展相对快速和居住人口更为密集,由于数据所限不能做进一步分析。并且全区大部分地区在近 30 年中能见度都在下降,而只有少数几个地区能见度略有好转。其中,下降最多的前三个城市是浙江大陈岛( $-16.2\text{ km}$ )、安徽阜阳( $-13.1\text{ km}$ )和浙江丽水( $-10.8\text{ km}$ ),能见度增加的前三个城市是上海龙华( $5.6\text{ km}$ )、安徽砀山( $5.1\text{ km}$ )和安徽六安( $4.7\text{ km}$ )。沿河两岸站点大部分都下降较大,说明沿河两岸能见度仍在继续恶化。

通过对全区的台站数据进行 EOF 分析可知,全区能见度变化趋势的前三模态特征向量的累积方差贡献率高达 99%,基本反映了全区能见度变化特征分布。

由表 1 可知,能见度第一模态的方差贡献率为

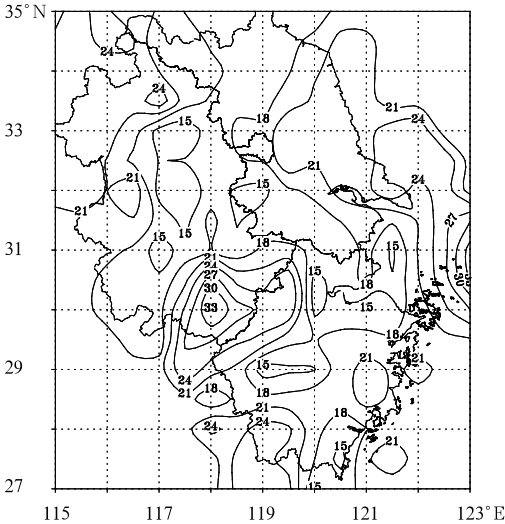


图 4 1980—2009 年长三角地区能见度平均值等值线图(单位:km)  
Fig. 4 The contour map of the annual mean visibility in the Yangtze River Delta region during 1980–2009 (unit: km)

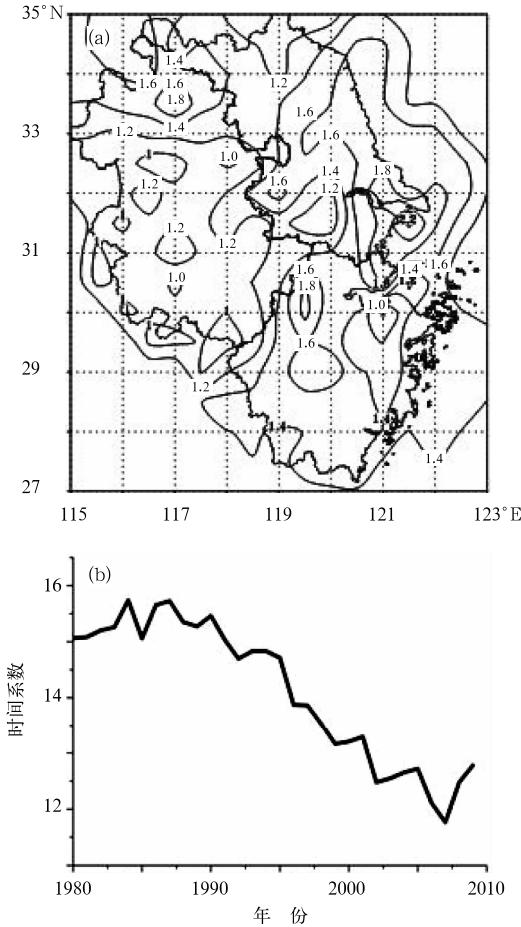


图 5 第一模态空间分布(a)和时间系数序列(b)  
Fig. 5 The spatial distribution (a) and time coefficient series (b) of the first mode

98.8%,说明长三角地区能见度空间分布(图 5a)主要呈第一模态分布。其特征向量在长三角区域内均为正值,表明在全区域中的变化趋势相同。在皖北和苏东地区出现大值区,说明该地区的能见度较好,从浙东南、浙西北、皖南到皖西呈逐渐降低趋势。从图 5b 第一模态的时间系数可以看出,在 20 世纪 90 年代之前出现振荡变化趋势,从 90 年代后持续下降,直到 2007 年达到最低谷,近几年能见度趋于平稳;第二模态方差的贡献率比较小,在空间分布图上出现了负值区域和正值区域,如图 6a 所示,说明负值区域某些年份的能见度呈上升趋势,这与图 4 空间分布图结果一致,即在皖北地区、上海地区有些地区能见度略有上升,而在正值区域仍然是处于下降趋势,从时间系数上也出现了正负值,如图 6b 所示,在 1994 年出现了正负值的转换,这说明原来的正负值区的变化趋势正好相反。第三模态方差的贡献率也比较小,在空间分布图上大部分区域是正值,如图 7a 所示,说

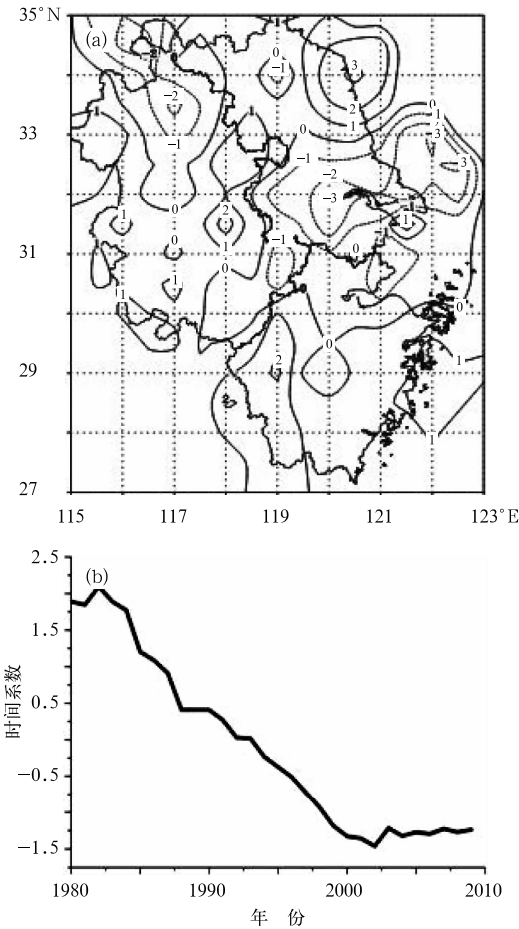


图 6 第二模态空间分布(a)和时间系数序列(b)  
Fig. 6 The spatial distribution (a) and time coefficient series (b) of the second mode

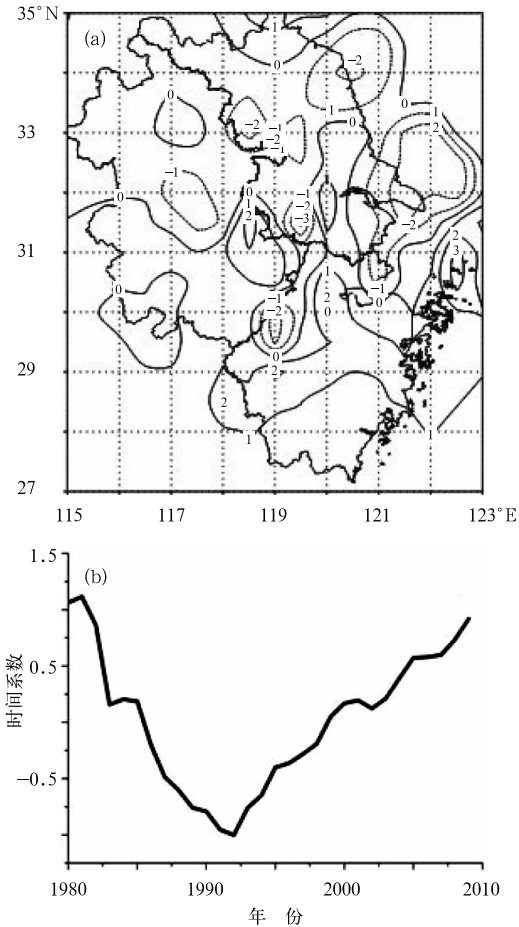


图 7 第三模态空间分布(a)和时间系数序列(b)  
Fig. 7 The spatial distribution (a) and the time coefficient series (b) of the third mode

表 1 能见度平均值 EOF 分析各模态方差贡献率 (单位: %)

Table 1 The EOF variance contribution from the mean visibility of the different modes (unit: %)			
模态	第一	第二	第三
方差贡献率	0.988	0.007	0.002
累计方差贡献率	0.988	0.995	0.997

明这个区域的变化趋势较一致,但是在时间系数上出现了正负值,如图 7b 所示,在 1986 和 1998 年出现了两次正负值变化,表示在该模态下,在 1985 年之前能见度呈下降趋势,1986—1998 年能见度出现上升趋势,而自 1999 年开始,又出现了上升趋势,这恰恰反映了近 30 年该区域能见度的整体变化趋势,这与 3.1 节中能见度变化分三个阶段的结论一致。

2.3 与 GDP 和能源消耗的关系

图 8 给出能见度和 GDP 及能源消耗的变化曲

线,图中纵坐标是逐年 GDP 和能源消耗数据与 1990 年的比值再乘以 100 所得。20 世纪 90 年代以来,长三角地区经济迅速发展,GDP 翻 10 倍,能源消耗增长 3 倍,同时能见度在这个期间也迅速下降,超过 20%,能见度与 GDP 的相关系数  $R^2=0.745$ ,可见伴随工业发展而产生大量的污染气体对能见度降低有较大影响。

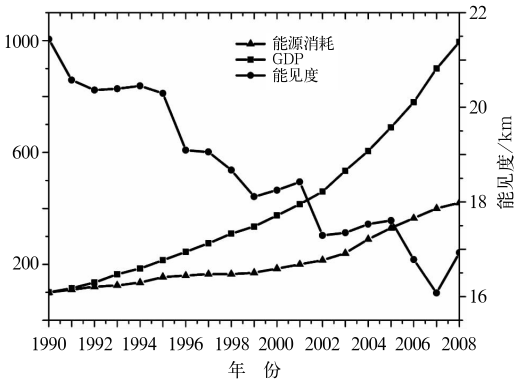


图 8 长三角地区能见度变化与 GDP 和能源消耗变化对比曲线  
(GDP 与能源消耗数据见参考文献[20])  
Fig. 8 The contrast curves of annual mean visibility, GDP and energy consumption during 1990—2008

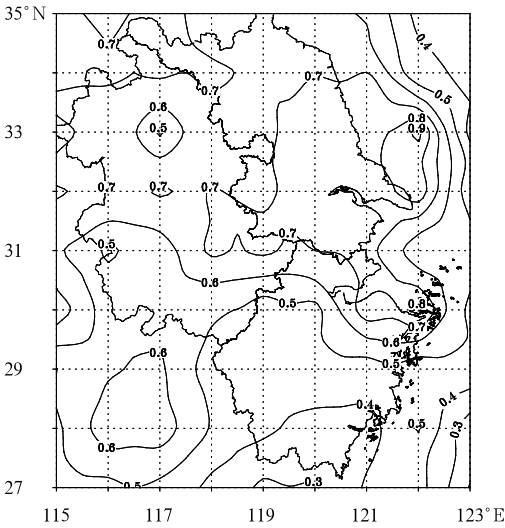


图 9 长三角地区 AOD 平均值空间分布  
Fig. 9 The spatial distribution of the mean AOD in the Yangtze River Delta region

2.4 AOD 与能见度空间域对比分析

大气气溶胶光学厚度(AOD)值的大小可以反

映能见度的好坏<sup>[12]</sup>。本文分析了 2000—2009 年 AOD 年平均值与能见度年平均值的相关关系,结果表明两者呈负相关,相关系数超过  $-0.91$ ,通过了  $=0.05$  的显著性水平检验。可见能见度受到大气气溶胶的直接影响,要想提高能见度,须要控制大气气溶胶的形成。图 9 显示浙南、浙北、皖南和沿海地区 AOD 值较小,苏东南和安徽省以北地区 AOD 值较大。对比图 4 可知,AOD 分布规律和能见度大小分布规律大体上是一致的,二者呈负相关的关系与 2.2 节的结论一致。

3 结论与讨论

(1) 在长三角地区,能见度年平均值为  $19.5 \pm 1.8$  km,其中最高值在 1984 年,达 21.9 km;而最低值为 16.1 km,出现在 2007 年。近 30 年能见度呈逐年降低趋势,平均年递减率接近  $-0.20 \pm 0.013$   $\text{km} \cdot \text{a}^{-1}$ 。能见度的逐年降低与 GDP 增加和能源消耗成负相关。

(2) 长三角地区能见度存在显著的季节差异,夏天能见度最好,平均可达到  $21.5 \pm 2.2$  km,秋春季次之,冬季最差,平均值为  $17.1 \pm 1.3$  km。该地区能见度月变化显著,7 月能见度最高,1 和 12 月能见度最低。

(3) 长三角地区能见度存在显著的地域变化特征,沿海地区能见度普遍好于内陆地区,沿江(河)两岸能见度比周围地区差。沿江(河)和沿海地区能见度的下降速度大于其他地区,在浙江东南部沿海地区更为明显。

(4) 利用 EOF 方法分析长三角地区能见度均呈下降趋势,少数地区在部分年份能见度略有好转。沿海地区能见度下降速度大于内陆地区。

(5) 通过比较能见度与 GDP 及能源消耗的变化关系可知,随着经济和工业发展,大量污染物的排放,使得能见度受到较大影响;基于 MODIS 业务处理系统提供 AOD 数据分析的长期能见度变化趋势与用地面观测资料分析的结论基本一致。

参考文献

[1] 施红,陈敏,韩晶晶. 上海浦东地区大气能见度的变化特征及影响因子分析[J]. 大气科学研究与应用, 2008,2:1-7.  
[2] Watson J G. Visibility: Science and regulation[J]. J Air and Waste Management Association, 2002,52(6):628-713.  
[3] 李子良. 气象能见度的突变特征及其在预报上的应用[J]. 气

象,1997,23(7): 35-38.

[4] 杨汉波,杨大文,李萍云,等. 五台山区地形雨减少与能见度减小的可能联系[J]. 气象,2010,36(4):16-20.

[5] Vinzani P G, Lamb P J. Temporal and spatial visibility variations in the Illinois Vicinity during 1949—1980[J]. Journal of Geophysical Research,1985,24:435-451.

[6] Naegele P S, Sellers W D. A study of visibility in eighteen cities in the western and southwestern United States[J]. Monthly Weather Review,109(11):2394-2400.

[7] Miller M E, Canfield N L, Ritter R T A, et al. Visibility changes in Ohio, Kentucky, and Tennessee from 1962 to 1969[J]. Monthly Weather Review,1972,100(1):67-71.

[8] 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[J]. 气象科技,2003,31(2): 109-114.

[9] 范引琪,李二杰,范增禄. 河北省 1960—2002 年城市大气能见度的变化趋势[J]. 大气科学,2005,29(4):526-535.

[10] Li Xiong. Change trend of atmosphere visibility from 1951 to 2006 year in Guilin[C]. 2009 International Conference on Energy and Environment Technology, 15-18.

[11] 钱峻屏,黄菲,崔祖强,等. 基于 MODIS 数据的海上气象能见度遥感光谱分析与统计反演[J]. 海洋科学进展,2004,22(增刊):58-64.

[12] 赵秀娟,陈长和,袁铁,等. 兰州冬季大气气溶胶光学厚度及其与能见度的关系[J]. 高原气象, 2005,24(4):617-622.

[13] 毕凯,王广河,毛节奏. 2009 年上海浦东新区能见度资料的深度分析[J]. 气象,2012,38(2):220-227.

[14] 伍红雨,杜尧东,何健,等. 华南霾日和雾日的气候特征及变化[J]. 气象,2011,37(5):607-614.

[15] 魏文秀. 河北省霾时空分布特征分析[J]. 气象,2010,36(3): 77-82.

[16] Gao Lina, Jia Gensuo, Zhang Renjian, et al. Visibility trends in the Yangtze River Delta of China during 1981—2005[J]. Journal of Air and Waste Management Association, (in press).

[17] 吴兑,等. 雾与霾[M]. 北京:气象出版社,2009:13.

[18] 杨军,李子华,黄世宏. 相对湿度对大气气溶胶粒子短波辐射特性的影响[J]. 大气科学,1993,23(2):239-247.

[19] 彭俊,高文良. 青藏高原及其邻近地区年平均气温的 EOF 分析方法应用[J]. 四川气象,2004,24(3):17-19.

[20] 中国人民大学区域与城市经济研究所课题组. 长三角地区能源消费与经济增长的实证分析[G]. 江淮论坛,2010,4:21-26.