

华南沿海地区太阳直接辐射、能见度 及大气气溶胶变化特征分析^{*}

罗云峰 吕达仁

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

何 晴

王 凡

(中国农业科学院农业气象研究所, 北京 100081)

(海南省气象局, 海口 570003)

摘 要 分析了中国华南地区福州、广州、海口、南宁等地 1961~1990 年太阳直接辐射总量、日照时数、总云量、大气能见度和地面水汽压等资料, 并利用这些资料反演了该地区大气气溶胶的光学厚度值。结果表明: 近 30 年来, 华南地区太阳直接辐射总量和日照时数呈明显下降趋势, 与 60 年代相比, 80 年代各站太阳直接辐射总量的年平均值均下降 20% 以上, 其中广州下降 29.2%; 日照时数, 广州减少了 1.1 h, 福州 1 h, 南宁 0.9 h, 海口 0.5 h。分析发现, 造成下降的原因不是由于云量或大气中水汽含量的变化, 而是由于地面能见度的明显减小和大气气溶胶的增加。4 站中, 14 时地面能见度均以夏季最好, 最高值出现在 7 月; 而地面能见度最差的季节海口、南宁两站在冬季, 福州和广州两站在春季 3、4 月份。相比较而言, 海口能见度最好, 福州和南宁次之, 广州最差。4 站大气气溶胶光学厚度值的大小、年及季节变化与地面能见度有密切的关系, 但两者不尽一致, 因此, 在研究气溶胶的辐射和气候效应时必须合理地考虑中高层大气气溶胶的分布。

关键词: 华南沿海; 直接辐射; 能见度; 气溶胶光学厚度

1 引言

近年来, 环境与气候的变化受到很多的关注。已有不少工作通过分析地面能见度或太阳辐射等资料, 揭示中国一些地区大气环境的变化^[1,2]。华南沿海属中国最早开放的经济特区之一, 80 年代以来经济的高速发展不可避免地会对该地区的环境造成了一定的影响。较为详细地分析该地区太阳辐射、地面能见度及云量等变化的工作还不多见。因此, 了解该地区大气状况与环境的变化具有一定的意义。

2 资料和方法

本文选取华南沿海地区的广州、福州、海口和南宁等 4 站, 分析了 1961~1990 年来各站太阳直接辐射日总量、日照时数、总云量、地面水汽压和地面能见度的年平均变化特征。在此基础上, 反演了各站的大气气溶胶光学厚度值, 分析了近 30 年来华南沿

海地区大气质量的变化情况。

太阳直接辐射资料为每日直射辐射日总量作年平均 (单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。日照时数为每日照射时数的年平均值 (单位: h / d)。地面水汽压为月平均值 (单位: hPa)。考虑到清晨多雾, 边界层多逆温及人类活动相对集中, 本文仅选取每日 14 时的地面能见度资料作分析 (单位: km)。同样, 总云量也取每日 14 时资料作年平均 (单位: 成)。气溶胶光学厚度值的反演将另文介绍。

3 结果和讨论

图 1 和图 2 分别为福州、广州、海口和南宁 4 站 1961~1990 年太阳直接辐射日总量和日照时数年平均值的变化曲线。可以看出: 4 站中, 海口直接辐射日总量最大, 福州次之, 南宁再次, 广州最小。30 年来, 4 站太阳直接辐射日总量均呈明显下降趋势。由表 1 可见, 和 60 年代相比, 80 年代各站太阳直接辐射日总量的年平均值均下降 20%

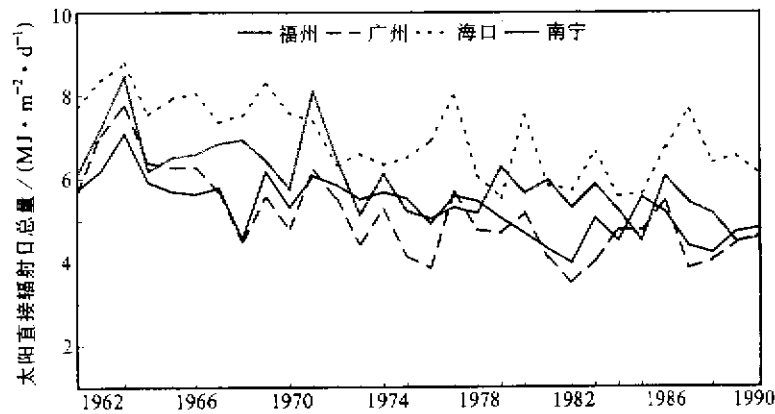


图 1 福州、广州、海口和南宁 4 站 1961~1990 年太阳直接辐射日总量年平均值变化

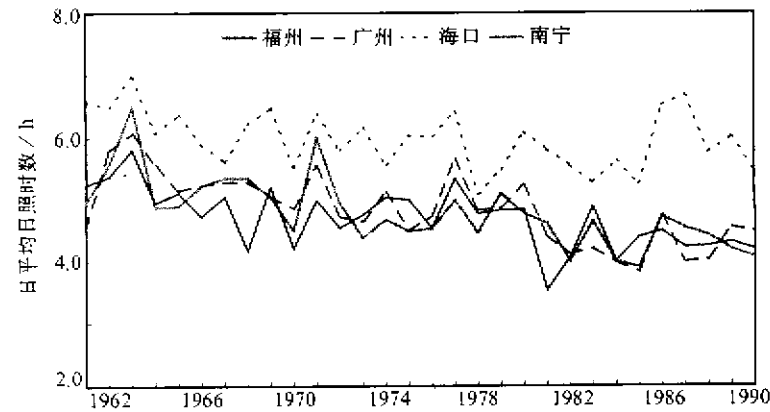


图 2 福州、广州、海口和南宁 4 站 1961~1990 年日照时数年平均值的变化曲线

以上，其中广州下降最为明显，达 29.2%。日照时数也呈明显的下降趋势，4 站 80 年代日平均太阳照射时数和 60 年代相比分别下降了 18.9%、20.8%，7.9%和 17.6%，相当于广州每日减少了 1.1 h，福州 1 h，南宁 0.9 h，海口 0.5 h。

表 1 太阳直接辐射、日照时数等要素的平均值

项 目	年 代	福 州	广 州	海 口	南 宁
太阳直接辐射 / (MJ · m ⁻² · d ⁻¹)	60 年代	6.80	6.12	7.95	5.87
	80 年代	5.33	4.33	6.31	4.66
	30 年平均	5.98	5.13	7.01	5.33
日照时数 / (h / d)	60 年代	5.3	5.3	6.3	5.1
	80 年代	4.3	4.2	5.8	4.2
	30 年平均	4.8	4.9	6.0	4.7
总云量 / 成	60 年代	7.06	7.44	7.71	8.18
	80 年代	7.28	7.67	7.82	8.10
	30 年平均	7.17	7.49	7.82	8.14
水汽压 / hPa	60 年代	18.95	22.04	25.33	21.50
	80 年代	18.96	21.77	25.67	21.76
	30 年平均	18.96	21.94	25.49	21.69
能见度 / km	60 年代	30.7	29.4	32.0	30.1
	80 年代	20.4	13.2	23.3	21.1
	30 年平均	26.6	21.6	27.0	26.2

地面太阳直接辐射和日照时数的变化受诸多因素的影响，如太阳常数、云量、水汽和其他痕量气体以及大气气溶胶的含量等。通常，在一个较短的气候背景内，太阳常数的变化可以忽略，痕量气体对太阳短波辐射的衰减也可以不考虑。最主要的影响因子是大气中云的变化，其次是水汽及气溶胶的影响。相对于云而言，后者是小量。因此，根据我们现有的资料，首先对 4 站 30 年来每日 14 时总云量的变化加以分析。

图 3 为 4 站每日 14 时总云量的年平均变化曲线。可以看到，30 年来，总云量的变化很小。80 年代与 60 年代相比，福州、广州两站增加了 3.1%，海口站仅增加了 1.3%，南宁站为 -0.9%，还略有减小。太阳直射辐射日总量和日照时数不仅与白天各

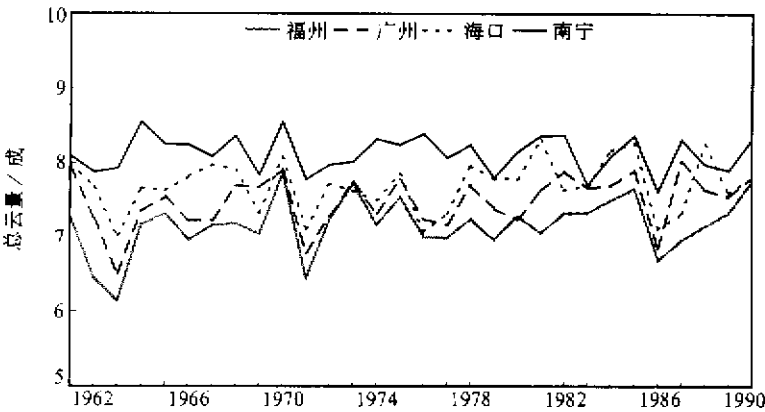


图 3 福州、广州、海口和南宁 4 站 1961~1990 年每日 14 时总云量年均值的变化

时刻的云量有关，还受云的高度和类型的影响。因此，仅凭 14 时总云量的变化分析云对辐射日总量和日照时数的影响是不够的。但从 14 时总云量的变化，至少可以推断造成该 4 站太阳直接辐射和日照时数如此明显减小的因素不全是云量的变化。4 站地面水汽压（见图 4）的变化就更小，80 年代与 60 年代相比变化均在 1.34% 之内。显然，造成太阳直接辐射和日照时数减小的因素也不是大气中水汽含量的变化。

接下来，我们再来分析地面能见度的变化情况。图 5 为 4 站 14 时地面能见度年平均值的变化曲线。结合表 1，可以看到：（1）海口能见度最好，福州和南宁次之，广州最差。1961~1990 年平均，福州、广州、海口和南宁的地面能见度分别为 26.6、21.6、27.0 和 26.2 km。（2）总体而言，从 1961 年到 1990 年，4 站 14 时的地面能见度均呈明显下降趋势。60 年代，福州、海口和南宁 3 站地面能见度都在 30 km 以上，就连能见度最差的广州也在 29 km 以上。到 80 年代，福州下降了 10.3 km，广州下降 16.2 km，南宁和海口分别下降 9 km 和 8.7 km。60 年代与 80 年代相比，福州、广州、海口和南宁 4 站地面能见度分别下降达 31.6%、55.1%、27.2% 和 29.9%。（3）比较而

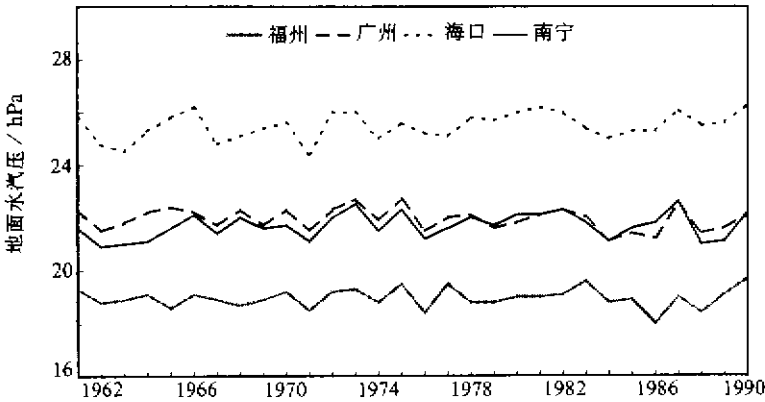


图 4 福州、广州、海口和南宁 4 站 1961~1990 年地面水汽压的年平均变化

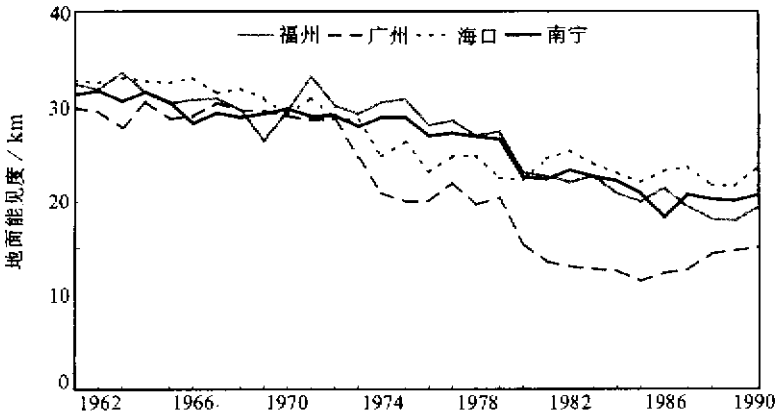


图 5 福州、广州、海口和南宁 4 站 1961~1990 年每日 14 时地面能见度的年平均变化

言, 各站 60 年代能见度下降趋势较为平缓, 从 70 年代起变得较为持续和明显, 到了 80 年代中后期, 广州能见度有所好转, 海口、南宁两站下降趋势也趋于平缓。

从上面的结果可以看到, 福州、广州、海口和南宁等地 30 年来太阳直接辐射日总量和日照时数的减少与地面能见度的减小密切相关。

地面能见度的变化主要受低层大气气溶胶状况的影响, 因此, 地面能见度的明显减小说明低层大气气溶胶粒子含量的显著增多。而大量增加的气溶胶粒子, 因其“阳伞效应”使到达地面的太阳直接辐射减弱, 而由于太阳直接辐射的减弱, 使得康培斯托克这种靠太阳直射光达到一定强度以上时留在化学试纸上的焦痕来记时的日照记时器记录的日照时数相应地减少。

到达地面的太阳直接辐射除受低层大气气溶胶含量的影响外, 同样还受大气中其他层次气溶胶粒子的影响。因此, 除分析地面能见度的变化外, 研究整层大气气溶胶的光学厚度具有重要的意义。下面, 我们利用太阳直接辐射日总量和日照时数, 以及地面气压和水汽压等资料, 配合 TOMS Version-7 臭氧观测资料, 反演该 4 站 1961~1990 年各年各月平均 $0.75\text{ }\mu\text{m}$ 大气气溶胶的整层光学厚度值 (AOD)。其原理是在月平均太阳直接辐射总量中, 合理地剔除云的影响、大气中气体分子的散射、水汽和臭氧的吸收等后, 提取气溶胶的信息。

表 2 60 年代、80 年代及 30 年平均
大气气溶胶光学厚度的平均值

	福州	广州	海口	南宁
60 年代	0.277	0.381	0.278	0.369
80 年代	0.301	0.441	0.392	0.396
30 年平均	0.294	0.443	0.337	0.381

表 2 为 60 年代、80 年代及 1961~1990 年 4 站 AOD 的平均值。可见, 平均而言, 广州 AOD 最大, 南宁其次, 海口再次, 福州最小。60 年代, 海口、福州两站 AOD 较小, 低于 0.28, 广州站最大也不到 0.4。到了 80 年代, 各站 AOD

均有所增加, 增加幅度以海口最明显, 与 60 年代相比增加了近 4 成, 广州增加了 15.8%, 也较明显, 福州和南宁增加幅度在 10% 以下, 相对较小。

图 6 为 4 站 AOD 的年平均变化曲线, 由图可见: (1) 30 年来福州、广州、海口、南宁 4 站 AOD 均呈增加趋势, 其线性拟合曲线 (图略) 的斜率, 海口最大

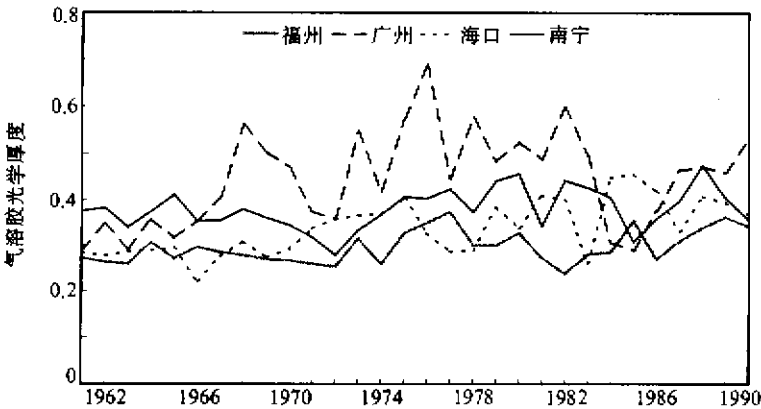


图 6 福州、广州、海口和南宁 4 站 1961~1990 年气溶胶光学厚度值的年平均变化

(0.0048)，广州次之(0.0041)，福州和南宁较小(0.0019 和 0.0017)。(2) 广州 AOD 年变率最大，最大值与最小值相差达 0.4，其他 3 站年变率相对较小。4 站多年 AOD 最小值 0.22 出现在海口(1966 年)，而最大值 0.69 则出现在广州(1976 年)。因此，我们可以将海口最小值 0.22 粗略地认为是该地区大气背景气溶胶的年平均光学厚度值。(3) 60 年代至 80 年代初，广州 AOD 持续增加，70 年代中期达到最大，1982~1985 年有所下降，1985 年以后继续增加。海口、南宁、福州 3 站 60 年代 AOD 变化不大，南宁、福州 2 站甚至有很弱的减小，自 70 年代起，3 站 AOD 一直呈起伏式增加，以海口增加趋势最为明显。

表 3 为福州、广州、海口和南宁 4 站 30 年各月太阳直接辐射、日照时数、14 时地面能见度和气溶胶光学厚度的相关系数。4 站多年各月太阳直接辐射总量和日照时数之相关系数均在 0.92 以上；太阳直接辐射和日照时数与 14 时地面能见度之相关系数的大小基本相当，除广州外，均在 0.57 以上(360 个样本 99%信度的相关系数约为 0.135)。4 站太阳直接辐射与气溶胶光学厚度之相关系数均在-0.66 以下，其绝对值明显大于太阳直接辐射与 14 时地面能见度之相关系数；但日照时数和 AOD 之相关系数与日照时数和 14 时地面能见度之间的相关系数相差不大。至此，我们可以肯定，该 4 站太阳直接辐射和日照时数的减小与地面能见度的减小或大气气溶胶光学厚度的增加有明显的关系，其中太阳直接辐射的减小主要是由整层大气气溶胶的增加所致，而日照时数的减小主要由大气低层气溶胶含量的增加，亦即地面能见度的减小所致。

表 3 太阳直接辐射 (R)、日照时数 (T)、地面能见度 (V) 和
气溶胶光学厚度 (AOD) 之间相关系数

		R	T	AOD			R	T	AOD
福州	T	0.96			海口	T	0.93		
	AOD	-0.72	-0.62			AOD	-0.75	-0.57	
	V	0.59	0.61	-0.52		V	0.72	0.68	-0.56
		R	T	AOD			R	T	AOD
广州	T	0.92			南宁	T	0.96		
	AOD	-0.66	-0.45			AOD	-0.67	-0.54	
	V	0.45	0.43	-0.24		V	0.57	0.57	-0.27

下面，我们再来分析福州、广州、海口和南宁 4 站多年平均 14 时地面能见度和大气气溶胶光学厚度的季节变化特征。图 7、8 分别为 4 站 30 年平均各月 14 时地面能见度和 AOD 的变化曲线，可以看到：

海口、南宁两站 14 时地面能见度夏季最好，最高值出现在 7 月，春秋其次，冬季最差。福州能见度也以夏季为最好，最高值同样出现在 7 月，广州夏季和秋季能见度相对都比较好，这两站能见度最差是在春季 3、4 月。4 站相比较而言，2 月到 7 月，海口能见度最好，8 月到 1 月，福州能见度最好，而广州各季均最差。

气溶胶光学厚度的最大值 4 站均出现在春季 3、4 月，极小值均出现在夏秋季节，其中福州、海口两站在 7 月，南宁在 9 月，广州则在秋末 10 月和 11 月。除海口、南宁两站气溶胶光学厚度最大值出现在春季而 14 时地面能见度最小值出现在冬季外，其余各站气溶胶光学厚度的最大值基本上对应于地面能见度的最小值。对于华南地区 4 站

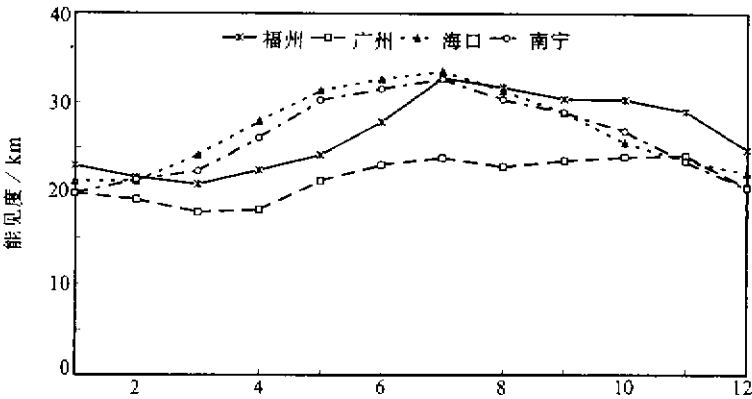


图 7 福州、广州、海口、南宁 4 站多年平均 14 时地面能见度的月变化

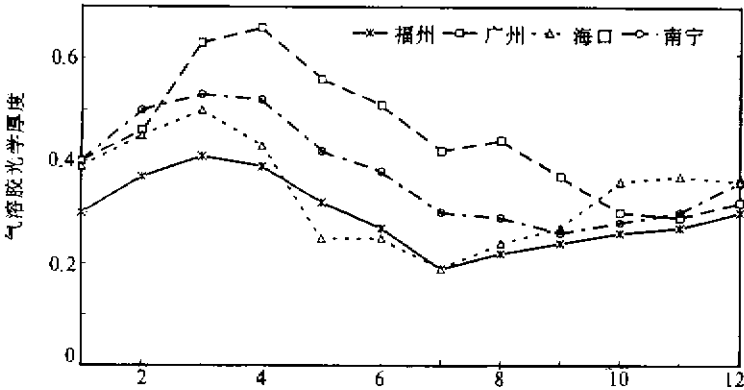


图 8 福州、广州、海口、南宁 4 站多年平均气溶胶光学厚度值的月变化

AOD 最大值出现在春季的原因，王炳忠等人通过对我国大气浑浊度的分析，认为南方浑浊度春季最大的原因可能同气溶胶中的液态水有关^[3]。就广州站而言，大气中的主要污染物 SO_2 、 NO_x 、TSP 和降尘的含量，均以春季为最^[4]。林子瑜等人通过对广州地区地面气溶胶的监测发现，广州市大气气溶胶的污染主要是小于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 的细粒子，它们除部分来自排放源的直接排放外，大部分来自气态污染物转化产生的二次气溶胶，而这种转化与源强度和环境相对湿度关系最密切^[5]。从气象条件看，广州春季相对湿度平均在 85% 以上，平均风速比较小，雾日多，1 月至 4 月间又多逆温，这些均为大气气溶胶的形成和维持提供了有利的条件。

通过比较 4 站气溶胶光学厚度和 14 时地面能见度的年变化曲线，可以发现除广州站 80 年代和其他站个别年份外，两者的变化趋势大体上相吻合，即地面能见度的减小趋势对应于 AOD 的增加趋势。由表 3 也可看到，两者 30 年各月气溶胶光学厚度和 14 时地面能见度的明显的负相关关系。

反演的月平均气溶胶光学厚度和 14 时地面能见度不完全一致的原因, 一方面是由于 AOD 是 1 个月的平均值, 表征该月整层大气的平均状态, 而地面能见度仅为 14 时低层大气的可见状况, 二者本身就存在一定的差别; 另一方面也说明了低层的大气状况虽与整层大气气溶胶的光学厚度密切相关, 但并非相当的一致。因此, 在研究气溶胶的辐射和气候效应时必须合理地考虑中高层大气气溶胶的分布状况。

4 小结

通过上述分析, 我们可以得到以下几点主要结论:

(1) 近 30 年来, 华南沿海福州、广州、海口和南宁等 4 站太阳直接辐射日总量和日照时数呈明显的下降趋势。与 60 年代相比, 80 年代各站太阳直接辐射日总量的年均值均下降 20% 以上, 其中广州下降达 29.2%; 日照时数分别减小了 18.9%、20.8%、7.9% 和 17.6%, 相当于广州每日减少了 1.1 h, 福州 1 h, 南宁 0.9 h, 海口 0.5 h。但同期 4 站 14 时总云量和地面水汽压的年变化却很小。

(2) 与此同时, 4 站 14 时地面能见度呈明显的下降趋势。60 年代与 80 年代相比, 福州、广州、海口和南宁 4 站地面能见度分别下降达 31.6%、55.1%、27.2% 和 29.9%。显然, 造成太阳直接辐射和日照时数明显减小的因素不是因为云量和大气中水汽含量的变化, 而与地面能见度的减小有关。

(3) 比较而言, 海口能见度最好, 福州和南宁次之, 广州最差。各站 60 年代能见度下降趋势较为平缓, 70 年代初起变得较为持续和明显, 到了 80 年代中后期, 下降趋势趋于平缓。

(4) 30 年来, 福州、广州、海口和南宁 4 站气溶胶光学厚度值呈增加趋势, 其中海口增幅最大, 广州次之, 福州和南宁较小。而 AOD 值广州最大, 南宁其次, 海口再次, 福州最小。

(5) 14 时地面能见度各站均以夏季最好。地面能见度最差的季节海口、南宁两站在冬季; 福州和广州两站在春季 3、4 月。气溶胶光学厚度的最大值四站则均出现在春季 3、4 月, 极小值则出现在夏秋季节。

(6) 大气气溶胶光学厚度值的大小、年及季节变化和地面能见度有密切的关系, 但两者不尽一致。太阳直接辐射和日照时数的减小是与整层大气气溶胶光学厚度的增加密切相关的。因此, 在研究气溶胶的辐射和气候效应时必须合理地考虑中高层大气气溶胶的分布状况。

参 考 文 献

- 1 邱金桓, 北京等地气象能见度的变化特征分析, 大气科学, 1986, 10(4), 437~442.
- 2 Li Xiaowen, Zhou Xiuji, Li Weiliang and Chen Longxun, The cooling of Sichuan Province in recent 40 years and its probable mechanisms, *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, 9(1), 57~68.
- 3 王炳忠, 潘根娣, 我国的大气透明状况, 气象学报, 1982, 40(4), 443~452.
- 4 全文哲, 李友琼, 陈镇华, 刘攸弘, 广州地区酸雨现状的研究, 酸雨文集, 北京: 中国环境科学出版社, 1989, 265~275.

- 5 林子瑜、唐孝炎、王文兴等. 广州地区 SO 转化规律及其形成气溶胶特征的研究, 环境科学研究, 1992, 5(3), 18~24.

An Analysis of Direct Solar Radiation, Visibility and Aerosol Optical Depth in South China Coastal Area

Luo Yunfeng and Lu Daren

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

He Qing

(Agrometeorology Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Wang Fan

(Hainan Meteorological Bureau, Haikou 570003)

Abstract The yearly averaged variation of daily direct solar radiation, sunshine duration, cloud cover, visibility and surface vapor pressure of four cities Fuzhou, Guangzhou, Haikou, and Nanning in South China coastal area are analyzed, and their aerosol optical depth retrieved. The results show that in recent 30 years, the direct solar radiation and sunshine duration decreased obviously, which was caused not the enhancement of cloud cover and vapor content, but the decrease of surface visibility and total atmospheric aerosol amounts. Compared to 1960s, the total daily direct solar radiation decreased more than 20 percent for each city in 1980s, among them Guangzhou reaches its highest value with 29.2%. Meanwhile, the decreases of sunshine duration for four cities are 1.0 h in Fuzhou, 1.1 h in Guangzhou, 0.9 h in Nanning and 0.5 h in Haikou, respectively. The best surface visibility occurs in summer for four stations, but the worst in winter for Haikou and Nanning and in spring for the other two stations. Among four cities, Haikou is good with its highest visibility, Fuzhou next, then Nanning, and Guangzhou is the worst one. The values of aerosol optical depth and its yearly and monthly variation are similar with surface visibility, but the difference still exists. So it is important to consider the aerosol distribution in middle and high layers in atmosphere when study aerosol's radiative and climate forcing.

Key words: South China coastal area; direct solar radiation; visibility; aerosol optical depth