

1954—2004 年珠江三角洲大气能见度变化趋势^{* 1}

黄 健¹⁾²⁾ 吴 兑²⁾ 黄敏辉³⁾ 李 菲²⁾
毕雪岩²⁾ 谭浩波²⁾ 邓雪娇²⁾

¹⁾(中国海洋大学海洋环境学院,青岛 266003)

²⁾(中国气象局广州热带海洋气象研究所,广州 510080)

³⁾(广东省气象局,广州 510080)

摘 要

利用珠江三角洲 5 个城市气象观测站(广州、深圳、台山、惠州、高要)的长期能见度观测资料,采用累积百分率、Ridit 分析法和烟幕/霾日频率 3 种统计分析方法,分析了 1954—2004 年珠江三角洲能见度变化趋势,初步探讨了珠江三角洲大气环境的变化特征及其可能原因。结果表明:近 50 年来,珠江三角洲城市能见度呈显著下降趋势。能见度的下降起始于 20 世纪 70 年代初,并在经济高速发展的 80—90 年代初进一步恶化,90 年代中期之后虽然能见度变化趋于平缓,但能见度下降的趋势仍未从根本上改变。珠江三角洲能见度与当地的人口增加和经济发展程度有密切的关系,同时污染物的区域输送对西部下风向城市能见度也有很大影响。珠江三角洲能见度未得到有效改善的主要原因,很可能是由于细粒子污染,尤其是二次粒子前体物如 SO₂ 和 NO_x 等的排放未得到有效控制。

关键词: 珠江三角洲; 能见度变化; 累积百分率; Ridit 分析法; 烟幕/霾日频率

引 言

气溶胶(即大气颗粒物)是指悬浮在大气中的液态或固态粒子。对流层气溶胶对全球的能量平衡和水循环有重大影响^[1]。气溶胶粒子一方面通过吸收和散射太阳辐射,改变地-气系统的能量收支;另一方面,还可作为云凝结核(CCN)影响云/降水过程,改变云的反射率。此外,气溶胶还是局地光化学烟雾和区域空气污染的主要成分^[2-3],造成大气能见度严重下降^[4],对人类健康造成不利影响^[5]。珠江三角洲是中国经济和工业发展最快的地区之一,自 1978 年以来平均经济增长速度高达 16.8%。2002 年在占全国 0.4% 的国土面积上聚集了全国 3% 的人口,创造了占全国近 9% 的国内生产总值,珠江三角洲已成为中国最大的工业制造区、繁荣的都市群之一,但经济的高速发展不可避免地消耗大量的能源,造成大气环境恶化和气候变化^[6-7]。

能见度下降是气溶胶污染最显著的后果之一,许多研究结果都表明能见度的变化与大气中的气溶胶细粒子(PM_{2.5})污染有密切关系^[8-10]。能见度作为衡量大气中细粒子污染程度中的一种替代指标,已被世界上许多地区所采用。Gomez, Lee 和 Doyle 等分析了英国各地的能见度变化趋势,并以此作为衡量空气质量变化的指标,认为 1973 年石油危机后能源消耗和污染排放量已发生改变,空气质量趋于好转^[11-14]。在美国,自从国会 1963 年制订了空气清洁法案后,大量的研究都采用长期能见度观测资料,通过分析能见度的变化趋势来评估大气环境的变化^[15-19]。20 世纪 80 年代起美国环境保护署将能见度变化趋势作为评估大气环境变化以及政府环境治理政策实施效果的重要参考指标,发布在每年的国家空气质量与污染物排放趋势报告中^[20]。

针对珠江三角洲的大气颗粒物污染问题已经开展了很多研究^[21-25],这些研究加深了对珠江三角洲污染机理等方面的认识。但由于珠江三角洲开展大

* 国家自然科学基金项目(40375002,40418008)和广东省自然科学基金项目(033031)、广东省气象局科研基金项目“珠江三角洲大气灰霾污染现状及预报、控制方法预研究”共同资助。

2006-09-13 收到,2007-08-03 收到再改稿。

气环境监测的历史还比较短,对珠江三角洲大气环境的长期变化趋势,尤其是经过20多年的经济高速发展后,大气环境变化趋势的认识还很少。本文选取了珠江三角洲在地理上均匀分布的5个城市(广州、深圳、台山、惠阳、高要)的能见度观测资料,采用累积百分率分析法、Ridit分析法和烟幕/霾日频率3种方法分析了1954—2004年大气能见度变化过程及可能原因。分析结果有助于认识珠江三角洲经济发展不同阶段的大气环境变化特征,评估政府、环保部门环境治理政策和措施所取得的成效,为进一步预测、控制和治理大气污染提供依据。

1 资料与方法

1.1 资料处理

本研究采用的大气能见度资料来自中国气象局地面气象观测站1954—2004年常规大气能见度观测。根据资料的完整性和可靠性,选取广州、深圳、台山、惠阳、高要5个在地理上基本上均匀分布的城市气象观测站作为代表(图1)。这些观测站是世界气象组织(WMO)基本观测站,有较长的观测历史,观测的项目几乎包括所有的气象要素,主要是:能见度、云量、风向风速、气温、相对湿度和现在天气现象等。每天02:00(北京时,下同),08:00,14:00和20:00进行定时能见度观测,观测站及所在城市的基本信息见表1^[26]。能见度观测在1954—1979年执行《气象观测暂行规范(地面部分)》的观测方法^[27],1980年后执行新的《地面气象观测规范》^[28]。根据上述观测规范对能见度资料进行了一致性处理,即将1980年后的能见度距离换算为1980年前

的能见度分级标准,使1980—2004年与1954—1979年的能见度分级保持一致。

本文研究的重点是大气颗粒物污染对能见度造成的影响,因此,过滤掉了能见度资料中降水、雾、大风、沙尘暴、扬尘等天气因素的影响。选取了没有上述天气现象出现的代码00(晴天),01(露),02(霜),03(结冰),04(烟幕),05(霾)。另外,以相对湿度小于90%为先决条件,还选取了代码10(轻雾)的资料,原因是轻雾与霾在观测时很难分辨,但当相对湿度小于90%时,雾很难形成,这样既可将轻雾中被误认的烟幕、霾中分离出来,又可将烟幕、霾中误报的轻雾过滤掉^[29]。最后,为避免早晨辐射雾、接地逆温的影响以及日/夜间观测目标物不一致造成的误差,只选择14:00的观测资料进行分析。因此,能见度资料同时满足以下3个条件:现在天气现象的代码为00,01,02,03,04,05和10;观测时间为本地时间14:00;相对湿度小于90%。

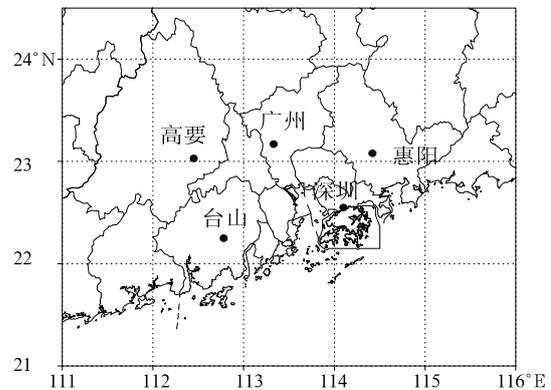


图1 珠江三角洲能见度观测站分布示意图

Fig. 1 Location of 5 meteorological observing stations in the Pearl River Delta

表1 珠江三角洲各能见度观测站点及所在城市的基本信息

Table 1 Information for 5 meteorological observing stations in the Pearl River Delta

站名	区站号	所属地区	纬度	经度	海拔高度/m	建站时间	1978年		2004年	
							非农业人口/万人	GDP/亿元	非农业人口/万人	GDP/亿元
广州	59287	广州	23.17°N	113.33°E	41.7	1951-01	482	43	738	4116
惠阳	59298	惠州	23.08°N	114.42°E	22.4	1952-07	26	7	114	685
台山	59478	江门	22.25°N	112.78°E	32.7	1953-01	43	14	221	835
深圳	59493	深圳	22.55°N	114.10°E	18.2	1952-07	31	2	598	3423
高要	59278	肇庆	23.03°N	112.45°E	41.0	1953-07	30	9	98	549

注:人口和GDP资料来自广东省统计公报(2004)^[26]。

1.2 能见度趋势分析方法

能见度是一个带有主观性的概念,即观测者能分辨出远处目标物轮廓的最远距离。影响能见度判断的因素包括:观测者的视力,目标物的形状、物理和光学特性等。观测者的主观意识增加了能见度的随机误差,而目标物与背景之间的反差率也往往使能见度被系统性地低估。因此,能见度观测记录往往低估了实际的能见距离。尽管人工观测的能见度存在一定的缺陷,但资料经过适当处理并采用合理的分析方法,能够描述能见度的长期变化趋势,为研究大气环境变化提供有效的定量信息。累积百分率和 Ridit 分析法已被证明是能见度分析客观的、可靠的方法,并在世界各地广泛采用。另外,针对珠江三角洲能见度较低的特点,还统计了烟幕/霾日的频率。

1.2.1 累积百分率法

能见度累积百分率法定义为:第 N 段的累积百分率是所有观测到的能见度中出现等于或超过 $N\%$ 值的次数。能见度趋势就是与某一特定的累积百分率对应的能见度距离随时间的变化。这一方法非常适于分析能见度这类被低估的或是其最低值观测资料的变化趋势^[15]。通常,这个趋势采用某一累积百分率为代表,例如能见度资料是连续的、且分布范围较大,则 50% 就是累积百分率的中值。在实际应用中,如果某一年 50 km 能见度比例超过了全年观测次数的 50%,那么 50% 的累积百分率只能通过外推得到。由于实际的累积百分率曲线并不是线性的,外推困难,即使外推出结果,误差也较大。因此,这个外推结果既不对应于累积百分率的中值,又不代表等于或超过 50% 累积百分率所对应的能见度。根据珠江三角洲能见度的特点,选取 60% 能见度累积百分率(即给出了能见度等于或超过 60% 的出现次数)作为能见度中值,既可避免由于外推或资料调整造成的误差,又可获取更高的精度^[16-17]。在本文中,以 60% 的累积百分率作为能见度长期变化中的能见度中值,代表平均的能见度水平;以 90% 的累积百分率作为能见度低值,代表较差的能见度水平。

1.2.2 Ridit 分析法

Ridit 分析法是对某一给定时段(例如,某一特定的季节或年份)能见度频率分布与参考能见度分布(所有时段能见度频率分布的集合)进行量化对比,给出某一给定时段能见度好于参考能见度的概率^[16-17]。在本研究中由 1954—2004 年以年为基础的所有能见度资料构成了经验型参考能见度分布,通过逐年的能见度频率分布与参考能见度分布进行对比,

可获得某一年能见度好于或差于 1954—2004 年 51 年整体平均能见度分布的概率序列。当某一年的平均 Ridit 值大于(或小于)0.5,表示这一年的能见度观测值好于(或差于)51 年的整体能见度,而平均 Ridit 值的变化曲线可反映能见度的上升和下降趋势。

Slone 曾对累积百分率和 Ridit 分析法做了详细的对比分析,认为两种方法都可较好地应用于能见度等非均匀分类频率分布的资料分析^[17]。平均 Ridit 值时间序列与累积百分率分析法的能见度中值相比,有以下几个方面的优点:以整个能见度时间序列作为参考分布,非常简捷地反映了整个能见度观测值的分布;在计算过程中不涉及任何外推;对气象条件的影响不敏感(如雨、雾、高相对湿度等)^[17]。但 Ridit 方法是用同一地点的能见度参考分布来计算平均 Ridit 值,平均 Ridit 值不仅不能做不同站点的对比,而由于不同时段 Ridit 值未经严格的检验,也不适于不同时段相互对比。而累积百分率方法由于采用了某一特定的累积百分率下能见度的变化作为指标,可做不同时段和站点之间的定量墩比。因此,Ridit 分析法和累积百分率法往往作为两种相互补充、验证的方法,用于能见度的趋势分析。

1.2.3 烟幕/霾日的频率

许多研究都采用 Lee 等^[12]提出的“非常好”能见度频率的指标(定义为:能见度大于 19 km 的出现频率),作为分析能见度变化的依据。但 Vazani 等^[30]的研究结果显示:“非常好”能见度频率在用于重污染条件下的趋势分析时,效果并不好。本文根据珠江三角洲能见度较低的特点,参照气象观测规范中烟幕和霾的定义^[31],计算珠江三角洲 5 个站点的烟幕/霾日频率,即经过过滤处理后(不包括雨、雾和高湿度条件下)所有观测数据中能见度小于 10 km 的比例。

2 结果与讨论

2.1 珠江三角洲能见度变化趋势

图 2 给出了 1954—2004 年珠江三角洲 5 个城市的能见度平均 Ridit 值和烟幕/霾日的频率变化趋势;图 3 给出了 5 个城市年能见度中值(60% 累积百分率)和能见度低值(90% 累积百分率)的 51 年变化趋势。由图 2,3 可见:在过去 51 年里珠江三角洲 5 个城市的能见度都呈显著下降趋势。能见度的下降趋势非常显著地反映在能见度中值急剧下降上,而且这一趋势在平均 Ridit 值、能见度低值以及烟幕/霾日频率的趋势中也明显反映出来。

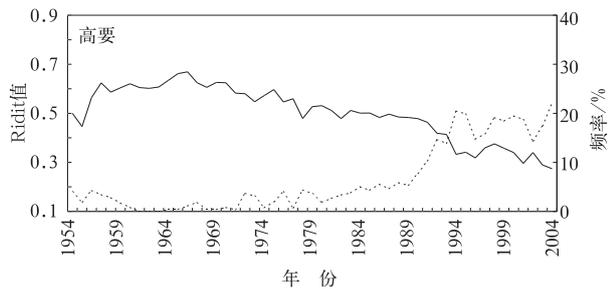
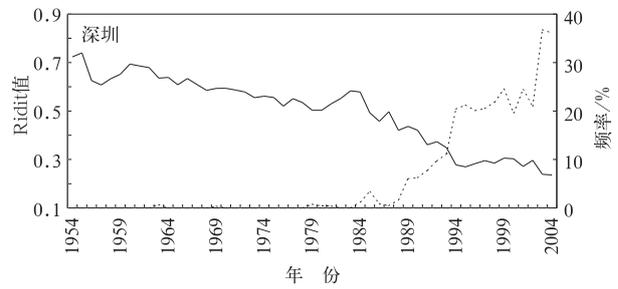
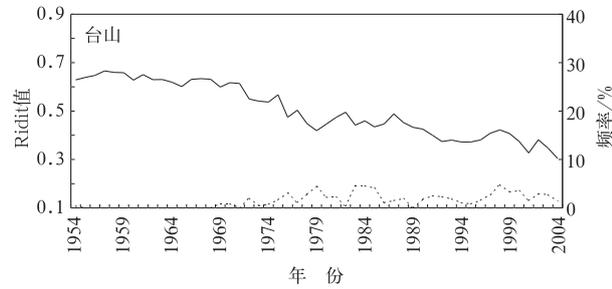
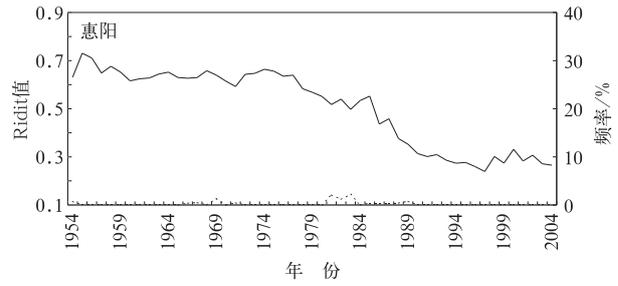
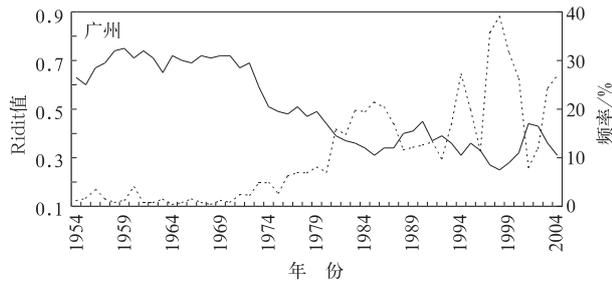


图2 珠江三角洲各城市1954—2004年平均Ridity值和烟幕/霾日频率的变化趋势
(图中实线为平均Ridity值线,点线为烟幕/霾日频率)
Fig.2 The trends of mean Ridity value and frequency of smoke/haze days for 5 cities in Pearl River Delta from 1954 to 2004
(solid curve denotes mean Ridity value, dashed curve denotes the frequency of smoke/haze days)

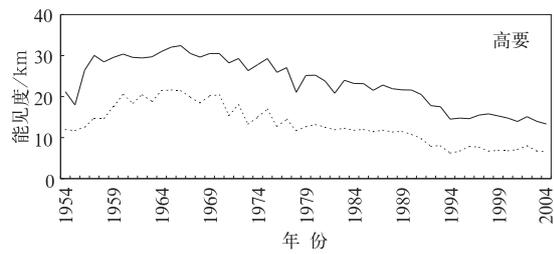
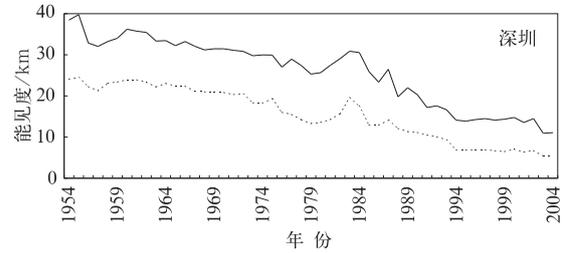
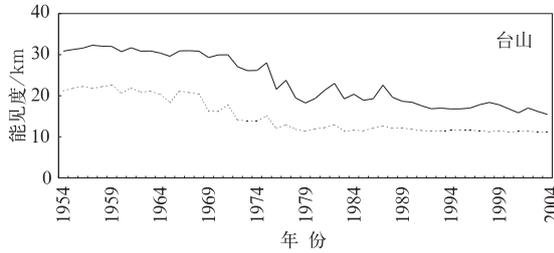
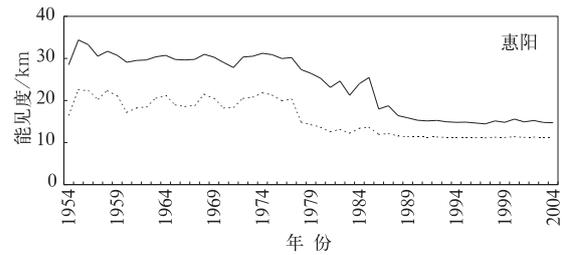
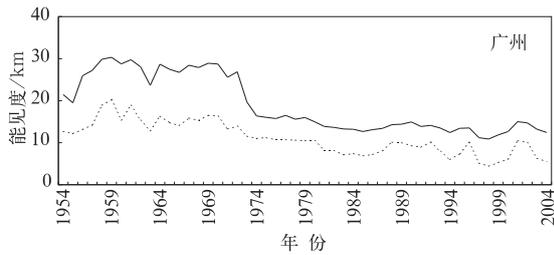


图3 珠江三角洲各城市1954—2004年能见度中值与能见度低值的变化趋势
(实线为能见度中值曲线,虚线为能见度低值曲线)
Fig.3 The trends of median and poor visibility for 5 cities in the Pearl River Delta from 1954 to 2004
(solid curve denotes the median visibility, the dashed curve denotes the poor one)

首先,20 世纪 50 年代并非珠江三角洲能见度的最好时期,由图 2,3 可见,50 年代深圳、台山和惠阳具有较高的能见度,而广州、高要的能见度经历了一个由差变好的转折过程。1955 年广州能见度中值只有 20 km 左右,1960 年上升至 30 km,能见度低值由小于 15 km,上升到大于 20 km;平均 Ridit 值也由 1955 年的 0.6 上升到 0.7 以上。高要的能见度在 20 世纪 50 年代也同样出现由差转好的过程,能见度中值、低值和平均 Ridit 值都呈上升趋势。对这一现象的一般解释是 50 年代全民大炼钢铁运动,大量使用土锅炉造成的污染排放量增多。但根据《广州市地方志》的 1951—1970 年广州能源销售量统计资料^[32]可知,这一时期正处于一个城市能源结构的转换期,由大量使用木柴作为城市生活或工业能源,过渡到以煤炭为主。由表 2 可见,在 1951—1957 年期间广州木柴的销售量都在 30×10^4 t 以上,而煤炭的销售量相对较小,能源消耗以发烟量较大的木柴为主;1959 年木柴的销售量大幅减少到只有 7×10^4 t 左右,1960 年只剩下 4 万多吨,而此时大气颗粒物排放相对较少的煤炭销售量大幅增加。木柴消耗量的减少与能见度的好转在时间上基本是一致的。

表 2 1952—1970 年广州市木柴与燃煤销售量统计表 (单位: 10^4 t)

Table 2 The consumption of firewood and coal for domestic at Guangzhou (unit: 10^4 t)

年份	木柴	煤炭
1951	34.1	17.9
1953	30.1	24.6
1957	32.5	40.3
1959	7.7	246.4
1960	4.0	325.4
1970	4.2	204.1

20 世纪 60 年代是近 50 年来珠江三角洲能见度较好的阶段。由图 2,3 可见,60 年代广州、高要和台山的能见度中值、低值和平均 Ridit 值都几乎处于最高水平,而深圳和惠阳只比 50 年代略低。由不同时期的能见度中值和低值的统计结果(表 3)可见,60 年代惠阳、台山、深圳和高要 4 个城市的能见度中值均高于 30 km,低值也在 20 km 左右,只有广州的能见度相对略低,但能见度中值也在 28 km 左右、低值约 15 km,能见度低于 10 km 的烟幕/霾现象极少出现。从珠江三角洲以至整个中国经济发展的历史来看,60 年代的工业规模很小,经济发展缓慢,一般很少受到大气污染的影响,能见度与当时的经济发展水平相符。

表 3 珠江三角洲的 5 城市不同阶段能见度中值和低值分布

Table 3 Median and poor visibility distributions for five cities in the Pearl River Delta of different decades

时段	能见度中值/km					能见度低值/km				
	广州	惠阳	台山	深圳	高要	广州	惠阳	台山	深圳	高要
1954—1960 年	26.1	30.7	31.5	35.2	26.6	15.3	19.8	21.8	23.2	14.8
1961—1970 年	27.8	30.0	30.5	33.0	30.5	15.6	19.4	19.7	22.1	19.9
1971—1980 年	18.3	29.0	24.0	28.4	26.2	11.4	18.3	13.5	16.7	13.8
1981—1990 年	13.7	20.6	20.1	25.6	22.4	8.3	12.5	12.0	14.2	11.7
1991—2000 年	12.7	15.0	17.3	15.1	16.1	7.1	11.2	11.4	7.8	7.5
2001—2004 年	13.8	14.9	16.1	12.5	13.5	8.1	11.2	11.3	5.9	7.1

20 世纪 70 年代初珠江三角洲已一定程度受到大气污染影响,能见度下降趋势已经开始形成。由图 2 可见,1972—1975 年期间广州的能见度中值由 1972 年的 26 km 下降到 1975 年的 16 km,下降幅度达 10 km;能见度低值 3 年的下降幅度也达到 3 km;在此期间的平均 Ridit 值由大于 0.6 下降到约 0.5,并且烟幕/霾日开始出现。其次是台山的能见度也出现明显下降趋势,能见度中值由 30 km 左右下降到近 20 km,能见度低值也下降到 15 km 以下,但下降幅度要比广州略小;高要和深圳虽然保持较高的能见度,但图 2 中 Ridit 值曲线和图 3 的累积百分率

曲线都显示出缓慢下降趋势;此时只有位于珠江三角洲东部的惠阳变化并不明显。范引琪等曾分析了河北省 11 个城市能见度的变化,发现早期的能见度一直维持在较高水平,能见度下降主要发生在 1979—1981 年^[29],即在我国改革开放经济高速发展之后。珠江三角洲多数城市能见度下降明显早于这一时间。

20 世纪 80 年代初期至 90 年代中期是珠江三角洲经济高速发展阶段,也是能见度的主要下降阶段。由图 2,3 中广州的能见度平均 Ridit 值和累积百分率曲线可见,广州的能见度经过 70 年代的下降

后,在80—90年代呈逐波下降趋势,并伴随着烟幕/霾日频率大幅增加,最高频率达到40%。深圳的平均Ridit值和累积百分率曲线可见,深圳的能见度在1984—1994年急速下降,能见度中值由30 km左右下降到约15 km,在11年的下降幅度达15 km;能见度低值也由18 km左右下降到仅剩约7 km;同时烟幕/霾日频率也从小于5%,上升到20%以上。高要的能见度70年代初至80年代末一直呈下降趋势,但能见度的下降速度在90年代初似乎有加快的趋势,在1990—1994年的5年内能见度中值下降了7 km,能见度低值下降了近4 km,而烟幕/霾日频率也由小于10%上升到接近20%。台山的能见度在70年代下降比较明显,但80年代以后平均Ridit值和能见度中值都呈缓缓的下降趋势。平均Ridit值和累积百分率曲线都显示,惠阳的能见度下降主要发生在70年代末至80年代末的10年内,但下降的起始时间要迟于其他城市,而且能见度也好于其他城市,烟幕/霾日频率接近为零。

20世纪90年代中期以后珠江三角洲城市能见度的变化似乎都趋于平缓,波动减小。从1954—2004年能见度总体变化来看,能见度恶化的趋势并未从根本上好转,仍处于历史的最低时期。对于90年代中期以后能见度变化幅度不大的原因,一方面可能是由于当地政府和环保部门开展了环境治理措

施,使大气污染物排放量的增长速度减慢;而更有可能是出于重污染条件下能见度的变化特性。Vinzani等曾对美国中北部一些工业区的能见度变化进行了分析,发现一些受大气污染影响较严重城市如芝加哥等,能见度多维持在较低的水平,难以进一步地恶化或出现根本性的好转^[30]。

2.2 珠江三角洲城市能见度特征

根据表3中能见度累积百分率平均值,可定量统计各城市能见度的下降幅度(表4)。为了方便比较,以5个城市能见度较好的20世纪60年代与2001—2004年的平均值进行对比。由表4可见,珠江三角洲的城市能见度中值下降幅度由大到小的排序是:深圳62.1%、高要55.7%、广州50.4%、惠阳50.3%、台山47.2%。能见度低值下降幅度由大到小的排序是,深圳73.3%、高要64.3%、广州48.1%、台山42.6%、惠阳42.3%。能见度中值和低值的下降幅度都以深圳最大,高要、广州其次,台山、惠阳相对较小。根据(Koschmieder)能见度公式: $R_m = \frac{3.91}{k_{ex}}$,其中 R_m 为气象能见距离, k_{ex} 为消光系数。由表4中20世纪60年代和2001—2004年能见度中值的统计结果可知:深圳、高要、惠阳、广州和台山2001—2004年大气细粒子的消光系数分别是60年代的2.6、2.3、2.0、2.0和1.9倍。

表4 珠江三角洲的5城市能见度下降幅度与烟幕/霾日频率

Table 4 Decrease of visibility and frequency of smoke/haze days for five cities in the Pearl River Delta of different decades

	能见度中值			能见度低值			烟幕/霾日频率
	1961—1970年	2001—2004年	下降幅度	1961—1970年	2001—2004年	下降幅度	2001—2004年
广州	27.8 km	13.8 km	50.4%	15.6 km	8.1 km	48.1%	17.8%
惠阳	30.0 km	14.9 km	50.3%	19.4 km	11.2 km	42.3%	0.0%
台山	30.5 km	16.1 km	47.2%	19.7 km	11.3 km	42.6%	2.1%
深圳	33.0 km	12.5 km	62.1%	22.1 km	5.9 km	73.3%	29.6%
高要	30.5 km	13.5 km	55.7%	19.9 km	7.1 km	64.3%	18.1%

另外,由表4中2001—2004年的能见度平均统计结果可见,近年来各城市间的能见度水平的差异很大。能见度中值由小到大的排序依次为:深圳12.5 km、高要13.5 km、广州13.8 km、惠阳14.9 km、台山16.1 km。能见度低值的排序依次为:深圳5.9 km、高要7.1 km、广州8.1 km、惠阳11.2 km、台山11.3 km。烟幕/霾日的出现频率与能见度中值和低值的统计结果基本一致,烟幕/霾日频率由大到小的排序依次为深圳29.6%、高要

18.1%、广州17.8%,台山和惠州很少出现。无论从累积百分率,还是烟幕/霾日的统计指标来看,深圳都是近年来珠江三角洲能见度最差的城市,其次为高要、广州,而台山和惠阳能见度较好。能见度最差的深圳与最好的惠阳相比,能见度中值低了3.1 km;能见度低值低了5.3 km;深圳的烟幕/霾日频率已经接近30%,而惠阳和台山基本上还未出现烟幕/霾。值得注意的是,深圳、高要的能见度直到20世纪90年代都一直好于广州(表3),经过了能

见度的大幅下降过程,深圳和高要的能见度水平已经低于广州。广州、深圳和高要 3 个城市的烟幕/霾日频率都已经非常高,几乎每 5 d 就有 1 d 能见度低于 10 km 的烟幕/霾日出现。

珠江三角洲各城市的能见度水平存在明显的差异,这显然与城市的人口数量、工业和经济发展程度有密切关系。由表 1 可见,人口众多、GDP 较高的城市(广州、深圳)往往具有较低的能见度,而中小城市(台山、惠阳)能见度较高,能见度与人口和经济发展水平基本上呈反比关系。但是高要与之不相符,高要位于珠江三角洲西侧的肇庆地区,是广东省著名的风景旅游区。由表 1 的城市基本信息可见,高要的工业并不发达,1978 年的市区人口为 30 万,国内生产总值为 9 亿元;2004 年城市人口发展到 98 万,国内生产总值为 549 亿元,远比广州和深圳的少,与惠阳的人口、经济规模基本接近。位于珠江三角洲上风向的惠阳能见度下降幅度相对较小,能见度水平较高,基本没有出现烟幕/霾日;而高要的下跌幅度明显超过惠阳,2001—2004 年的能见度水平远低于惠阳,烟幕/霾日的出现频率达到近 20%。珠江三角洲冬季以偏北风和东北风为主,夏季西南风占优势,而在春季和秋季两季都盛行偏东风^[33],较高频率的偏东风使珠江三角洲西侧地区更容易受到上游污染物输送的影响。除了受到其他一些可能的因素,例如天气气候差异或观测点位于排放源附近等,高要的能见度变化表明:能见度不仅可能与当地的大气污染物排放量变化有关,盛行风输送的污染物也是珠江三角洲下风向城市大气污染的重要因素。

2.3 近年来能见度变化与污染物排放

鉴于 20 世纪 90 年代后大气环境质量不断恶化,政府开展了一系列控制大气污染物排放、清洁空气、改善大气环境的治理措施,如“广东省酸雨防治规划”和“广东省蓝天工程计划”等。其中广东省政府 2000 年制订的“广东省蓝天工程计划”是有史以来规模最大、耗资最多的大气环境治理计划,共规划大气污染综合治理和重点工业污染源废气治理项目 118 个,总投资 57 亿元^[6]。这一大气污染治理措施对改善珠江三角洲大气环境的成效如何,一直是令人关注的问题。

广东省环保部门的统计数据表明,治理措施在减少大气颗粒物的排放方面取得了一定的成绩。表 5 的统计结果^[34]显示在 20 世纪 90 年代广东省大气颗粒物排放量很大,其中 1997 年的工业烟尘、工业粉尘的排放量分别达到 36.7×10^4 t 和 116.90×10^4 t。随着一系列治理措施的实施,特别是在 2000 年以后实施“广东省蓝天工程计划”后,使工业烟尘、工业粉尘的排放量大幅下降,2004 年的排放量分别减少到只有 25.2×10^4 t, 39.40×10^4 t,烟尘排放量减少了三分之一,粉尘排放量减少了近三分之二。但是,由近年来能见度变化来看,虽然大气颗粒物排放量明显减少,但并未从根本上解决大气颗粒物污染,尤其是细粒子污染问题。由图 2、图 3 的能见度变化曲线可见,能见度下降趋势虽然在 90 年代末得到了一定程度的缓解,但从 2001—2004 年能见度的变化趋势来看,能见度并没有从根本上出现好转的迹象,平均 Ridit 值、能见度中值曲线趋势都是下降的,并且 2004 年广州、深圳和高要 3 个污染较严重的城市烟幕/霾日的频率还呈逐渐增加的趋势;2004 年深圳、高要和台山的平均 Ridit 值和能见度累积百分率值都是近 51 年的最低值;而广州、惠阳的也只是比历史上的最低值略高。

大气能见度的变化与低层大气中细粒子浓度有密切关系。而细粒子浓度可归结于直接排放量和二次转换粒子形成率。首先,近年来的大气污染物排放量(表 5)表明,粉尘和烟尘等直接排放的大气颗粒物虽然大幅减少,但 SO_2 的排放未得到有效控制,排放量仍呈增长趋势。 SO_2 作为大气颗粒物的重要前体物,经光氧化过程转化为硫酸和硫酸盐,是细粒子气溶胶的主要来源。另外,随着珠江三角洲经济和交通运输的迅速发展,使汽车拥有量大幅增加,也将使大气中的 NO_x 等浓度上升。一些研究结果表明自 1985 年以来珠江三角洲的 NO_x 、 O_3 浓度一直是全国最高的^[21,24], NO_x 、挥发性有机化合物及其经光化学过程产生的二次转换细粒子不断增加^[23-24]。珠江三角洲的大气细粒子污染,特别是 SO_2 、 NO_x 等形成的二次转换粒子还未得到有效控制^[35],这很可能是珠江三角洲大气能见度未得到有效改善的主要原因。

表5 广东省1995—2004年大气污染
排放量统计(单位:10⁴t)

Table 5 The emission of atmospheric pollutants in
Guangdong Province during 1995—2004 (unit:10⁴t)

年份	SO ₂	工业烟尘	工业粉尘
1995	53.50	20.81	
1996	73.10	56.83	
1997	69.30	36.70	116.90
1998	67.88	34.16	92.20
1999	69.49	34.73	94.42
2000			
2001	97.31	18.24	35.86
2002	95.34	17.97	33.56
2003	97.52	21.93	43.84
2004	114.80	25.20	39.40

注:资料来源于1995—2004年广东省环境公报。

3 小结

1) 3种趋势分析方法(平均Ridit值、累积百分率值和烟幕/霾日频率)的结果显示:在1954—2004年珠江三角洲5个城市的能见度都出现了显著的下降,伴随着能见度的下降,广州、深圳和高要3个能见度较低的城市烟幕/霾日频率大幅增加。

2) 20世纪50年代广州、高要等城市出现了能见度由差转好的过程,这很可能是由于城市能源结构改变;60年代是近50年能见度水平比较好的阶段;能见度下降趋势起始于70年代初,并在经济高速发展的80—90年代初进一步恶化;90年中期后,能见度的下降幅度相对减缓,但能见度下降的总体趋势仍未得到根本改变。

3) 累积百分率的统计结果显示,珠江三角洲能见度的下降幅度以深圳最大、高要次之,随后为广州、惠阳和台山。其中2001—2004年深圳、高要、广州、惠阳和台山的平均能见度水平比20世纪60年代分别下降了62.1%、55.7%、50.4%、50.3%、47.2%;而相应的大气细粒子消光系数已分别为60年代的2.6、2.3、2.0、2.0和1.9倍。2001—2004年的平均能见度显示深圳是珠江三角洲能见度最差的城市,其次为高要、广州,而台山和惠阳能见度较好。

4) 一方面,能见度变化与当地的人口增加和经济发展有密切关系;另一方面,污染物的区域输送对珠江三角洲下风向城市有显著的影响,是珠江三角洲西部城市能见度下降的重要因素。

5) 工业烟尘、粉尘等大气颗粒物的直接排放量目前虽大幅减少,但是SO₂和NO_x等二次粒子前体

物的排放未得到有效控制,这很可能是能见度未得到有效改善的重要原因之一。

人工观测的能见度资料还存在着一定的缺陷。首先,能见度资料的等级记录方法可能低估了真实的能见距离;第二,标识物的改变和气象观测站的迁移,会使最大能见距离也会发生改变;第三,局地天气因素和环流型的差异,也对大气污染物的输送和扩散速率产生很大的影响,从而影响能见距离。本文采用能见度观测资料,初步分析了珠江三角洲大气环境变化,尤其是大气气溶胶污染的变化过程,得出的初步结论有待以后进一步验证。

参考文献

- [1] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] Dickerson R R, Kondragunta S, Stenichkov G, et al. The impact of aerosols on solar ultraviolet radiation and photochemical smog. *Science*, 1997, 278: 827-830.
- [3] Chen L, Doddridge W A, Dickerson B G, et al. Origins of fine aerosol mass in the Baltimore-Washington corridor: Implications from observation, factor analysis, and ensemble air parcel back trajectories. *Atmos Environ*, 2002, 36: 4541-4554.
- [4] Malm W C. Characteristics and origins of haze in the continental United-States. *Earth-Sci Rev*, 1992, 33: 1-36.
- [5] Samet J M, Dominici F, Curriero F C, et al. Fine particulate air pollution and mortality in 20 US cities, 1987—1994. *N Engl J Med*, 2000, 343: 1742-1749.
- [6] 广东省人民政府. 广东省蓝天工程计划. http://www.gd.gov.cn/gov_files/wj_title.asp?id=637.
- [7] 李晓文,李维亮,周秀骥. 中国近30年来太阳辐射状况研究. *应用气象学报*, 1998,9(1):24-31.
- [8] Ozakaynak H A, Schatz D, Thurston G D, et al. Relationships between aerosol extinction coefficients derived from airport visual range observations and alternative measure of airborne particle mass. *Journal of Air Pollution Control Association*, 1985, 35: 1176-1185.
- [9] NAPAP. Acid deposition: State of Science and Technology//Irving PM. Visibility: Existing and Historical Conditions-Causes and Effects. Report 24, National Acid deposition Assessment Program, Washington DC, 1990.
- [10] Malm W C, Sisler J F, Huffman D, et al. Spatial and seasonal trends in particle concentrations and optical extinction in the United States. *J Geophys Res*, 1994, 99: 1347-1370.
- [11] Gomez B, Smith C G. Visibility at Oxford 1926—1985. *Weather*, 1987, 42: 98-106.
- [12] Lee D O. The choice of visibility statistics in the analysis of long-term visibility trends in summer in southern England. *Weather*, 1988, 43: 332-338.

- [13] Lee D O. Regional variations in long term visibility trends in UK, 1962—1990. *Geography*, 1994, 17: 151-159.
- [14] Doyle M, Dorling S. Visibility trends in the UK 1950—1997. *Atmos Environ*, 2002, 36: 3161-3172.
- [15] Trijonis J C, Yuan K. Visibility in the Northeast: Long-term Visibility Trends and Visibility/Pollutant Relationships. EPA Report #600/3-78-075. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, 1978.
- [16] Craig C, Faulkenbery G D. The application of Ridit analysis to detect trends in visibility. *Atmos Environ*, 1979, 13: 1617-1622.
- [17] Solane C S. Visibility trends I: Methods of analysis. *Atmos Environ*, 1982, 16: 41-51.
- [18] Solane C S. Visibility trends II: Mideastern United States 1948—1978. *Atmos Environ*, 1982, 12: 945-950.
- [19] Naegele P S, Sellers W D. A study of visibility in eighteen cities in the western and southern United States. *Mon Wea Rev*, 1981, 100: 67-71.
- [20] Schichtel B A, Husar R B, Falke S R. Haze trends over the United States, 1980—1995. *Atmos Environ*, 2001, 35: 5205-5210.
- [21] Zhang Y, Zhu X, Slanina S, et al. Aerosol pollution in some Chinese cities (IUPAC technical report). *Pure Appl Chem*, 2004, 76: 1227-1239.
- [22] Wang X, Carmichael G, Chen D. Impacts of different emission sources on air quality during March 2001 in the Pearl River Delta (PRD) region. *Atmos Environ*, 2005, 39: 5227-5241.
- [23] Lee Y L, Sequeira R. Visibility degradation across Hong Kong: Its components and their relative contributions. *Atmos Environ*, 2001, 34: 5861-5872.
- [24] Wang T, Ding A J, Blake D R, et al. Chemical characterization of the boundary layer outflow of air pollution to Hong Kong during February-April 2001. *J Geophys Res*, 2003, 108: 8787-8801.
- [25] 李成才, 刘启汉, 毛节泰, 等. 利用 MODIS 卫星和激光雷达遥感资料研究香港地区的一次大气气溶胶污染. *应用气象学报*, 2004, 15(6): 641-650.
- [26] 广东省统计局. 广东省统计公报. 北京: 中国统计出版社, 2004.
- [27] 中央气象局. 气象观测暂行规范(地面部分). 北京: 中央气象局, 1951.
- [28] 中央气象局. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 1979.
- [29] 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. *大气科学*, 2005, 29(4): 526-535.
- [30] Vinzani P, Lamb P. Temporal visibility variations in the Illinois vicinity during 1949—1980. *J Climate Appl Meteor*, 1985, 24: 435-451.
- [31] WMO. Manual on Codes, International Codes, Vol. I. I (Annex II to WMO Technical Regulations), Part A—Alphanumeric Codes, WMO-No. 306, Geneva, Switzerland, 1995.
- [32] 广州市地方志编辑委员会. 广州地方志. 广州: 广州出版社, 2000.
- [33] 广东省气象局气候资料室. 广东省气候. 广州: 广东省科学技术出版社, 1975.
- [34] 广东省环保局. 广东省环境公报, 1995—2004. <http://www.gdepb.gov.cn/zwx/hbzkgb/gongbao/index.htm>.
- [35] 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究. *气象学报*, 2006, 64(4): 510-517.

Visibility Variations in the Pearl River Delta of China During the Period of 1954—2004

Huang Jian¹⁾²⁾ Wu Dui²⁾ Huang Minhui³⁾ Li Fei²⁾ Bi Xueyan²⁾ Tan Haobo²⁾ Deng Xuejiao²⁾

¹⁾ (College of Marine Environment, Ocean University of China, Qingdao 266003)

²⁾ (Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080)

³⁾ (Guangdong Meteorological Bureau, Guangzhou 510080)

Abstract

Atmospheric visibility is one of the good indicators of atmospheric fine particle pollution. To well understand the evolvement course of atmospheric environment of the Pearl River Delta (PRD), the temporal variation of visibility is examined by using three statistical methods, namely, cumulative percentiles, Ridit analysis and frequency of smoke/haze days, based on the historical visibility data of five geographically dispersed cities (Shenzhen, Gaoyao, Guangzhou, Taishan and Huiyang) from 1954 to 2004. The characteristics of visibility variation and its possible cause are investigated preliminarily.

The temporal variation shows that there is a remarkable decline in visibility for all cities of PRD in the 51 years studied. At the end of 1950s visibility in some cities, e. g. , Guangzhou and Gaoyao, evolves from low to high. The increasing consumption of coal and decreasing usage of trees seems to be responsible for this trend. In 1960s, visibility is generally high and experienced very good air quality in PRD. The visibility degradation for PRD is at early 1970s, which is prior to that of some other areas in China. Between the early 1980s and early 1990s, a stage of high-speed economic growth, the visibility gets worse. After the middle of 1990s the decline trends of visibility eventually become moderate. In the course of visibility variation of PRD, it should be pointed out that the visibility trend for PRD in the 51 years studied actually descends all the same even though the visibility declining rate slows down after the middle of 1990s. From 1960s to the period of 2001—2004, the declines of the average visibility are about 62.1% , 55.7% , 50.4% , 50.3% and 47.2% , in Shenzhen, Gaoyao, Guangzhou, Taishan and Huiyang, respectively, and the average extinction coefficient of atmosphere for the period of 2001—2004 is about 2.6 , 2.3 , 2.0 , 2.0 and 1.9 times of that of 1960s. In recent years, Shenzhen has the lowest visibility in PRD, followed in turn by Gaoyao, Guangzhou, Taishan and Huiyang. The trend of visibility in PRD is mostly in accordance with local economic development and population growth in this period. It is also found that Gaoyao, a city located at the western part of PRD, has a lower visibility in comparison with the eastern city of PRD. It shows that the regional transport of atmospheric pollutants has a significant effect on the visibility over the down wind area. Furthermore, the relationship of visibility trends with atmospheric pollutant emissions in recent years is also discussed. It is found that visibility in PRD has not been improved substantively while the direct emission of particles has markedly decreased in the past few years since a series of prevention and control projects of atmospheric pollutants are implemented. The likely cause is that gas-phase aerosol precursor species, especially SO₂ and NO_x, have not been under control.

Key words: the Pearl River Delta; visibility variation; cumulative percentage; Ridit analysis; frequency of smoke/haze days