

大城市区域霾与雾的区别和灰霾天气预警信号发布

吴兑^{1,2}

(1.中国气象局广州热带海洋气象研究所,广东 广州 510080; 2.中山大学环境科学与工程学院大气科学系,广东 广州 510275)

摘 要:由于经济规模的迅速扩大和城市化进程的加快,都市霾现象或者是灰霾天气日趋严重,霾与雾的区分成为一个非常现实,又迫切需要解决的问题。通常在平时已达到饱和的水汽压,对相当于球面的云雾滴来讲就是未饱和的,那样云雾滴就会蒸发;在水汽条件不变时,云雾滴由于蒸发而变小,导致它的平衡水汽压升高,则更易蒸发掉。在不饱和大气中小于数微米的云雾滴必然蒸发,而且伴随着蒸发云雾滴尺度会进一步变小,导致曲率越来越大,蒸发速率越来越快。过去错误认为凝结核可以在低相对湿度情况下产生凝结生成雾滴的观点,是忽视了粒子曲率作用的结果,将实验室大颗粒(常常达毫米量级)的吸湿性特征,延用至次微米粒子造成的。降温是达到饱和形成雾滴的即重要又主要的物理过程,云雾是低温下饱和气块的可见标志。在云雾中必然存在凝结或凝华过程,因而必然伴随着潜热释放,这就使云雾内的温度高于环境,在云雾内必然盛行微弱的上升气流,不可能是下沉气流,这些宏观过程在霾层内是不存在的,因而成为识别霾与雾的重要的宏观动力条件。在对历史资料进行统计时,在排除降水、吹雪、雪暴、沙尘暴、扬沙、浮尘、烟幕,等等视程障碍现象的情况下,通过调试相对湿度,使得雾与轻雾反映自然的年际与年代际气候波动,而霾反映由于人类活动而引起的趋势性变化,其限值大体在 90%左右,与美国和英国讨论霾影响能见度的长期变化趋势的研究中使用的相对湿度限值相同,他们都去除了相对湿度>90%的资料,只研究了相对湿度<90%时的能见度变化趋势。进行相对湿度订正才能确保资料的高质量。近年来由于人类活动大气气溶胶污染日趋严重,1980 年代以来大幅增加的霾日,绝大部分是由于人类活动影响的气溶胶细粒子污染造成的。依据本文和以前的研究,给出了霾与雾区分的概念模型,霾与雾观测的标准,和灰霾天气预警信号发布的标准。

关键词:大城市区域; 霾; 雾; 灰霾天气; 预警信号

中图分类号:X131.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6504(2008)09-0001-07

Distinction between Haze and Fog in Urban Metropolitans and Hazy Weather Warnings

WU Dui^{1,2}

(1.Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080, China; 2.Department of Air Science, School of Environment Science and Engineering, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Haze is an important indicator of air quality while fog has definite meanings for weather. By statistical analysis of observation data and excluding cases of precipitation, snow drift, snowstorm, sand storm, sand dust and smoke fog which cause low visibility, the threshold of relative humidity was adjusted to identify fog/light fog to make it follow natural annual and decadal climate variations. Haze which can reflect trends linking to human activities was set at a threshold of 90% relative humidity, which was the same as that proposed by American and British researchers in their study on long-term variation trend of the effect of haze on visibility, to ensure high quality of data. Haze days had dramatically increased since 1980s, most of which were due to human activity related pollution of aerosol fine particles. Based on the findings, a conceptual model was proposed to distinguish fog from haze, and standard for observing fog and haze and criteria for warning signals for haze weather in some provinces were presented.

Key words: metropolitan area; haze; fog; haze weather; prewarning signals

我国改革开放以来,由于经济规模的迅速扩大和城市化进程的加快,在城市群区域和大城市的大气气溶胶污染日趋严重,由气溶胶造成的能见度恶化事件

越来越多,原来少见的天气现象“霾”成为一种常见现象,原来在各类词典上霾是一种非水成物造成视程障碍的自然现象,近年来由于人类活动大气气溶胶细粒

收稿日期:2007-12-09;修回 2008-03-28

基金项目:国家自然科学基金(40375002,40418008,40775011、U0733004);“863”课题(2006AA06A306,2006AA06A308);“973”课题(2006CB403701,2002CB410801);广东省自然科学基金(033029);广东省重点科技攻关项目(2004A30401002,2005B32601011);广州市应用基础研究项目(2004J1-0021)
作者简介:吴兑(1951-),男,(满族)研究员,硕士生导师,主要研究方向大气物理化学与大气环境,(电话)020-87675975(手机)13926035451(电子邮箱)wudui@grmc.gov.cn。

子污染日趋严重,因而出现灰霾一词,指主要由人类活动造成的霾现象,因而有着重要的环境意义。在中国气象局气预函[2005]53号“关于下发《天气预报等级用语业务规定(试行)》的通知”中已经明确出现“灰霾天气的预报与预警信号”,最新国家科技部立项的973课题中,明确指出大气灰霾是重点研究方向:“大气气溶胶分布、变化及其气候影响。深入认识我国不同区域大气气溶胶分布与变化特点及区域大气灰霾形成机理,研究关键气溶胶的辐射气候效应,为我国制订相应政策提供科学支撑。”。另外,2006年6月1日广东省正式开始发布灰霾预警信号,是省人大批准和省府下文的。但在现实的观测实践中,区分造成视程障碍的天气现象是霾还是轻雾或雾,长期以来存在不同认识。曾经讨论过这一问题^[1-2],也提到全国对霾与轻雾或雾的识别没有统一的判别标准,各省的实际情况也是五花八门,南方大多是用相对湿度的某一阈值来区分,绝大多数定得相当低。在相当长的时期内,将大量都市霾记成了轻雾。霾与雾的区分成为一个非常现实,又迫切需要解决的问题。我们通过调查和理论分析,提出了区分霾与轻雾或雾的建议。文章发表后,陆续收到一些反映和质疑,其中的疑惑主要来自如下几方面:吸湿增长的逆过程,即雾滴蒸发过程是否可以在未饱和环境中存在液滴?另外,“霾”与“灰霾”如何识别?等等。本文试图讨论这些问题,并尽可能给出霾与雾区分的概念模型。

1 霾粒子吸湿增长成为雾滴和雾滴在不饱和大气中存在的可行性

曾经讨论过雨滴在云下的下落蒸发问题^[3],对于云雾滴而言,由于其没有明显的下落末速度问题要简单得多,在这里只需考虑云雾滴的定常凝结蒸发:

$$r \frac{dr}{dt} = \frac{D}{\rho_L R_w \left(\frac{T_r + T_\infty}{2} \right)} (E_\infty - E_r) \quad (1)$$

式中 r 是云雾滴半径, D 是水汽扩散系数, ρ_L 是云雾滴密度, R_w 是水汽比气体常数, E 是水汽压力, T 是温度, 下标 r, ∞ 分别代表云雾滴表面和环境中的值。

从云雾滴的凝结蒸发方程来看,控制云雾滴凝结蒸发的关键参数是液滴表面的饱和水汽压,云雾滴可以看作球形,它的曲率半径很小,由于表面张力存在,在曲面上形成了弯月面生成表面张力产生的附加压强,力的方向指向云雾滴中心,与水滴表面平衡的饱和水汽压要比平面饱和水汽压增加一个附加值,这个值在云雾滴半径越小时越大。这样在平面时已达到饱和的水汽压,相当于球面的云雾滴来讲就是未饱和的,那样云雾滴就会蒸发;在水汽条件不变时,云雾滴

由于蒸发而变小,导致它的平衡水汽压升高,则更易蒸发掉^[4]。

对于球形水滴表面的平衡水汽压可以用汤姆逊公式表示。

$$E_r = E_\infty \times e^{C/r} \quad (2)$$

$$\text{其中 } C_r = 2\alpha/\rho_L R_w T$$

在标准状态下 ($T=273^\circ\text{K}$, $\rho_L=1\text{g/cm}^3$, $\alpha=75$ 尔格/ cm^2 , $R_w=4.6\times10^6$ 尔格/ $\text{g}\cdot^\circ\text{C}$), $C_r=1.2\times10^{-1}\mu\text{m}$ 。

在 $r>10^{-1}\mu\text{m}$ 时,可以得到近似公式

$$E_r/E_\infty = 1 + C_r/r \quad (\text{凸面}, r \mu\text{m}) \quad (3)$$

$$E_r/E_\infty = 1 - C_r/r \quad (\text{凹面}, r \mu\text{m}) \quad (4)$$

根据以上讨论可以得到平衡水汽压与云雾滴半径的关系如表 1。

表 1 平衡水汽压与水滴半径的关系
Table 1 The relationship between equilibrium water vapor pressure and radius of water droplet

水滴半径 $r(\mu\text{m})$	10^{-1}	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4
平衡水汽压 $E_r/E_\infty(\%)$	323	112.5	101.2	100.12	100.01	100.00

从表 1 看到, $10\mu\text{m}$ 的云雾滴需要 1.2% 的过饱和度才能凝结增长, $1\mu\text{m}$ 的云雾滴需要 12.5% 的过饱和度才能凝结增长,这在地球上完全不可能,因而,在不饱和大气中小于数微米的云雾滴必然蒸发,而且伴随着蒸发云雾滴尺度会进一步变小,导致曲率越来越大,蒸发速率越来越快。这个过程比吸湿增长过程要快得多。

这就进一步证实了过去的结论,在自然环境中,吸湿性粒子没有可能单纯通过湿度增加吸湿增长成为雾滴,虽然大气中可能存在的吸湿性气溶胶的相变湿度比较低,但那是在曲率非常小的情况下的试验结果,任何吸湿性物质的相变湿度都与粒子直径有关,粒子越小,相变湿度越大,气溶胶粒子的实际相变湿度比室内实验值还要大得多^[4]。因而,在非饱和条件下,不但非水溶性的霾粒子不能转化成雾滴,即便是水溶性的霾粒子一般也不可能转化为雾滴。过去错误认为凝结核可以在低相对湿度情况下产生凝结核生成雾滴的观点,是忽视了粒子曲率作用的结果,将实验室大颗粒(常常达毫米量级)的吸湿性特征,延用至次微米粒子造成的。

结合过去的讨论^[2],可以确定,如果不是在地势较高处看到山边或低洼处的雾层,在城市区域出现的各个方向能见度均匀恶化现象是霾造成的,而雾和轻雾必须需要一定的过饱和度才能稳定存在,考虑到相对湿度传感器的误差,也需要相对湿度 $>95\%$ 才能认定是雾或者轻雾。

2 霾与雾的宏观动力过程明显不同

实际上近地层大气中每时每刻总是有霾粒子存在,而雾滴的存在是少见或罕见的;霾滴要想通过吸湿增长成为雾滴,必须有足够的过饱和度,能够越过过饱和驼峰才行,这在自然界并不容易。因而,在非饱和条件下,不但非水溶性的霾不能转化成雾滴,即便是水溶性的霾粒子一般也不可能吸湿转化为雾滴。

降温是达到饱和和形成雾滴的即重要又主要的物理过程,正像大气物理学教科书指出的那样,云雾是低温下饱和气块的可见标志^[4],在每立方米的饱和空气中,4℃时含有6.4g水,10℃时含有9.4g水,20℃时含有17.1g水,30℃时含有30.0g水。如果过程降温从30℃降到20℃,就会有12.9g水从空气中析出,形成雾滴,降温是达到饱和和形成雾滴的即重要又主要的物理过程。在气温高达30℃以上的盛夏季节报道有浓雾,是匪夷所思的,在高温情况下形成云雾,需要的水汽供应量非常大,这在地球上几乎不可能!

霾的出现有重要的空气质量指示意义。而雾或轻雾的记录,有明确的天气指示意义,与特定的天气系统相联系。区分霾和轻雾(雾),应该根据影响天气系统的变化和台站所处相对位置,结合宏观特征的各种判据来确定。既然云雾是低温下饱和气块的可见标志,在云雾中必然存在凝结或凝华过程,因而必然伴随着潜热释放,这就使云雾内的温度高于环境,在云雾内必然盛行微弱的上升气流,不可能是下沉气流,这些宏观过程在霾层内是不存在的,因而成为识别雾

与霾的重要的宏观动力条件。

实际上,人类活动造成的气溶胶污染主要是使都市霾出现的频数增加,而对水雾的影响相对较少。有些分析认为近年来轻雾明显增加的结论,就是因为资料处理过程中没有正确的区分霾与轻雾而得到了错误的结果。

3 有关 WMO 及其它专门机构的相关建议

在不同历史时期,WMO和其它国家气象机构曾经给出过区别霾与雾的建议,其中也有使用相对湿度作为辅助判据的(见表2),在WMO1984年的报告中,建议haze的相对湿度大约<80%^[9],在1996年的报告中又建议相对湿度比一个百分数低,例如80%^[6];而对于mist,WMO1984年的报告中,建议高的相对湿度,在1996年的报告中又建议相对湿度通常比100%低,在2005年的报告中建议相对湿度>95%^[7];而英国天气局在1994年规定出现haze时相对湿度<95%^[10],英国天气局分别在1982、1991、1994年规定出现mist时相对湿度低于100%但≥95%^[8-10];对于fog,各个机构都描述为相对湿度通常接近100%。造成这些差异的原因,主要是长期以来对组成霾的气溶胶粒子的认识需要相关知识积累的过程,随着近年来对气溶胶物理化学性质的深入了解,这个问题逐步得到了共识,再加上我国气象部门拓展服务领域的需求,更加需要在观测预报业务上明确区分霾与雾。

表 2 不同机构的雾/轻雾/霾的标准
Table 2 Standards of fog / mist / haze by different institutions

	Fog	Mist	Haze
WMO No.266 1984	vis <1000m RH generally near 100%	RH Generally lower than 100%	RH <about 80%
WMO No.8 1996	vis <1000m	vis >=1 km high RH	vis >1km RH is less than a certain percentage, e.g. 80%
WMO No. 782 2005	vis <1000m	vis 1000–5000m RH >95%	vis <=5000m
Observer's Handbook, UKMO, 1982	vis <1000m RH generally near 100%	vis >=1000m RH >=95%, generally <100%	No limit in vis
Meteorological Glossary, UKMO, 1991	vis <1000m	vis >=1000m RH > about 95%	No limit in vis
Handbook of Aviation Meteorology, UKMO, 1994	vis <1000m RH generally near 100%	vis >=1000m RH >=95%, generally <100%	RH < 95%

在对历史资料进行统计时,在排除降水、吹雪、雪暴、沙尘暴、扬沙、浮尘、烟幕、等等视程障碍现象的情况下,通过调试相对湿度,使得雾与轻雾反映自然的年际与年代际气候波动,而霾反映由于人类活动而引起的趋势性变化,其限值大体在 90%左右,而 Malm 和 Doyle 在讨论美国和英国霾影响能见度的长期变化趋势的研究中^[11-12],也明确指出初始的能见度观测资料需要去除降水等视程障碍并进行相对湿度订正才能确保高质量,他们都去除了相对湿度>90%的资料,只研究了相对湿度<90%时的能见度变化趋势。因而结合我们过去的

讨论,可以初步给出霾与雾区分的概念模型,如图 1。

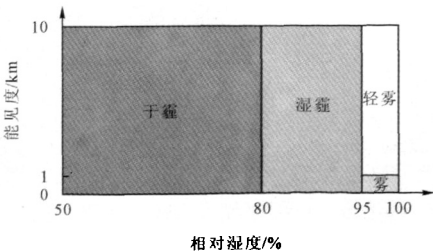


图1 霾与雾区分的概念模型
Fig.1 A conceptual model for distinguishing haze from fog

4 粤港澳的灰霾(烟霞)预警信号发布标准分析

珠江三角洲地区集中了广东、香港、澳门不同体制背景的 3 个气象部门,各自发布的天气预报可以在媒体上同时看到,因而有必要进行协调。粤港澳 3 方气象部门经过多次协调,达成一致,形成了粤港澳灰霾(烟霞)预警信号发布标准(图 2),这里需要说明两个问题,首先是称谓问题,港澳称“烟霞”,应该说汉语翻译更加人性化,也比较易于被公众接受,而“霾”是个古字,较为生僻难写难认难读,始于 2002 年 12 月 15 日在北京召开的“我国区域大气灰霾形成机制及其气候影响和预报预测研讨会”的“灰霾”一词,是由我国一些青年科学工作者提出的,主要是想和自然现象“霾”有所区分,这可以进一步讨论取得共识。第二个问题是限值问题,能见度限值取为 5km,主要是考虑预警信号发布不宜太多太频繁,如果按照 10km,国内不少城市每年都会有 100~200d 发布预警信号,对公众和地方政府都会形成一定的压力。而相对湿度的限值有一个区间 80%~95%,主要是考虑霾与雾是可以相互转化的,而在观测和预报的业务实践过程中,用一个限值去一刀切来区分雾与霾,也不具备可操作性,况且区分霾和轻雾(雾),还需要考虑影响天气系统的连续变化和台站所处相对位置,结合宏观特征的各种判据来确定,因而给出一个区间,让观测员和预报员有一定的酌情权。

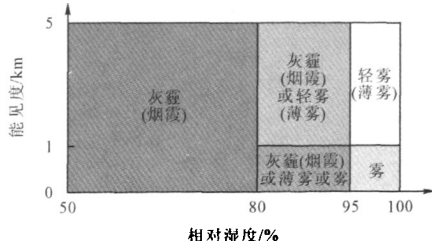


图2 粤港澳的灰霾(烟霞)预警信号发布标准
Fig.2 Standards for issuing pre-warning signals of haze in Guangdong, Hong Kong and Macao

表 3 给出了使用广州观象台资料在过去 5 年可能发布灰霾预警信号的次数,可以看到平均每年可能发布 30 多天,和环保局公布的空气污染指数超标的天数比较接近,当然,不同城市需要根据本地的情况调整相关指标。

表 3 广州观象台过去 5 年可能发布灰霾预警信号的天数
Table 3 The number of days in which pre-warning signals were likely to be issued in the past five years by Guangzhou Observatory (RH≤80%)

能见度	2001	2002	2003	2004	2005	平均
$V \leq 5\text{km}$	6	6	25	82	47	33
$API > 100$	12	35	51	62	33	39

5 广东省灰霾观测预报的标准与建议

为贯彻实施《广东省突发气象灾害预警信号发布规定》(广东省人民政府 105 号令),做好广东省突发气象灾害预警信号的发布工作,广东省气象局相继制定了“广东省观测雾、轻雾和霾的标准”和“广东省灰霾天气预警信号发布细则”。

广东省气象局于 2006 年发文“粤气业[2006]16 号关于执行广东省观测雾、轻雾和霾发报标准的通知”,制定了广东省观测霾、轻雾、雾的识别标准(图 3),在国内第一次统一了省级气象部门区别霾与雾的观测标准。

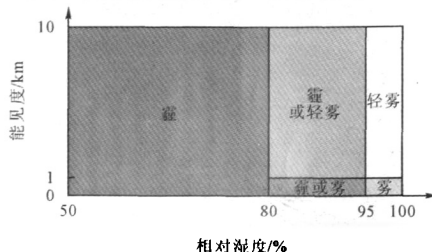


图3 广东省气象局观测霾、轻雾与雾的标准
Fig.3 Standards for observing haze, mist and fog at Guangdong Meteorological Bureau

广东省气象局于 2007 年发文“粤气[2007]3 号关于下发《广东省灰霾天气预警信号发布细则》的通知”,主要包括灰霾天气预警信号含义及发布后的确认时间(表 4),以及灰霾天气预警信号发布原则。

表 4 灰霾天气预警信号含义及发布后的确认时间

Table 4 The meaning of pre-warning signals for hazy weather and time of confirmation after issuance

信号名称	信号符号	信号含义	确认时间
灰霾天气黄色预警信号		12h 内可能出现灰霾天气,或者已经出现灰霾天气且可能持续。	必须至少每 6 小时确认一次预警信号是否要改变(不变,改变,解除。不变情况下只需内部确认。)

灰霾天气预警信号发布原则规定,灰霾天气预警信号的发布和解除,以当地观测站的能见度为主要标准,并且须将能见度和相对湿度结合起来考虑。

(1)按《广东省突发气象灾害预警信号发布规定》中灰霾天气预警信号的要求发布。

(2)对于能见度 $\leq 3\text{km}$ 并且相对湿度 $\leq 80\%$;或出现下述(3)、(4)的情况且空气污染指数(API)超过 150 时,省局将对灰霾天气预警信号发布情况进行考核。

(3)当能见度 $> 3\text{km}$ 而 $\leq 5\text{km}$,且相对湿度 $\leq 95\%$ 时,酌情发布。

(4)当能见度 $\leq 3\text{km}$ 并且相对湿度介于 80%~95%之间时,酌情发布。

(5)建有大气成分观测站的台站发布灰霾天气预警信号时可参考附表的指标(表 5)。

表 5 灰霾天气中的一些大气成分参考指标
Table 5 Reference indexes of some atmospheric compositions in hazy weather

指标	代码	限值(日均值)	单位
黑碳浓度	BC	8.0	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
$<2.5\mu\text{m}$ 的颗粒物浓度	$\text{PM}_{2.5}$	65.0	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
$<1\mu\text{m}$ 的颗粒物浓度	PM_{10}	50.0	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
气溶胶光学厚度	AOD	0.6	无量纲量
臭氧浓度	O_3	150(小时均值)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
浑浊度	β_s	600	Mm^{-1}

灰霾天气导致能见度恶化的实质是细粒子气溶胶污染^[13],因而有条件的话,大气成分指标对于灰霾的观测和预报有重要的参考价值。另外,在常规天气预报中需要根据情况,预报灰霾天气,也可以按照表 6 预报灰霾天气指数。

表 6 灰霾天气指数表
Table 6 Indexes of hazy weather (RH \leq (80~95)%)

能见度(m)	指数	等级	服务描述
5000~10000	一	轻度灰霾天气	适当减少户外活动
2000~5000	二	中度灰霾天气	减少户外活动,停止晨练
<2000	三	重度灰霾天气	尽量留在室内,避免户外活动

考虑到多种因素,灰霾天气预警信号的发布要慎重,应以实况出现为主要发布准则。具体的能见度限值,各地可以根据出现灰霾天气的气候规律适当调整。

为了方便广东乃至华南地区各级气象部门开展灰霾天气的预报预警业务,广州区域气象中心将逐日的华南地区气溶胶光学厚度的 EOS/MODIS 卫星图片(图 4)和随时更新的广州市 vis 与 RH 实时图像(图 5)放在网上供大家参考。

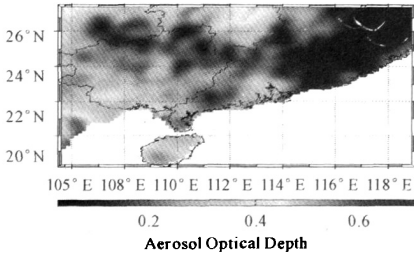


图4 逐日的华南地区气溶胶光学厚度的EOS/MODIS卫星图片
Fig.4 Daily optical thickness of aerosols in South China as shown in EOS/MODIS satellite photos

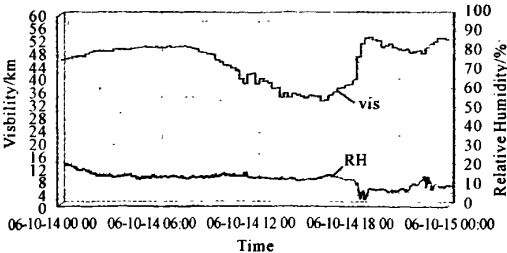


图5 随时更新的广州市vis与RH实时图像
Fig.5 Continuously updated real-time image of vis and RH for Guangzhou

网站地址如下 :<http://www.itmm.gov.cn/>;<http://172.22.1.201/qygx/>;<http://172.22.1.201/yww/>。

另外,广州区域气候中心从 2005 年开始在年度广东省气候公报^[14]中发布灰霾天气的年霾日分布图(图 6)。

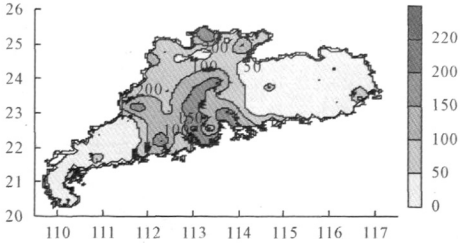


图6 广东灰霾天气的2006年霾日分布图
Fig.6 Distribution of hazy days across Guangdong Province in 2006

6 关于“霾”与“灰霾”

灰霾一词的出现始于 2002 年 12 月 15 日在北京召开的“我国区域大气灰霾形成机制及其气候影响和预报预测研讨会”,这个研讨会是应因国际环境外交斗争的需要,由中国气象局、国家环保总局和外交部联合主持召开的,在会上我国一些青年科学家提出了“灰霾”一词,以称呼由于人类活动增加导致的城市区域近地层大气的气溶胶污染现象。

大气气溶胶来源广泛,其物理化学特征复杂。粒子尺度范围悬殊,大小可差数个量级。自然现象“霾”和“灰霾”都是气溶胶组成的,但灰霾和原来意义上的“霾”已经很难区别了。就像沙尘暴一样,也是由气溶胶形成的视程障碍现象,气溶胶本身十分复杂,粒子尺度范围也十分悬殊,但是如果主题是沙尘暴天气,那就主要由天气背景和能见度来界定了。目前灰霾和原来意义上的“霾”已经很难区别了。对灰霾我们也不仅仅由相对湿度来区别,视程障碍现象主要还是用能见度来区分,就像沙尘暴、浮尘、雪暴等类似,都有一套根据天气实况演变和目测识别的规定,相对湿度是辅助指标,用来区分霾(灰霾)与雾(轻雾),这种由于人类活动影响出现的人工“霾”,学术期刊上曾经用烟雾、干雾、烟尘雾来称谓,但均未形成共识,而近年来灰霾一词逐渐被公众接收,也慢慢出现在行业管理部门的文件中和国家 973 项目指南中。一种过去少见或鲜见的现象频繁出现后,形成共识需要一个过程,而学术刊物恰恰提供了一个讨论平台,可以各抒己见,慢慢形成共识,然后才能形成新词被词典收入,大量新词的确认都是通过使用、讨论、形成共识这个过程的,笔者认为“灰霾”一词也是这样,近两年来已经在核心期刊刊登了以灰霾为题

的论文 7 篇,在使用过程中慢慢调整最后形成学术界公认的说法。

需要重申的是,原来在各类词典上霾是一种非水成物造成视程障碍的自然现象,每年出现的次数只有几天,而且强度不大,大多数能见度仅仅刚刚低于 10km;近年来由于人类活动大气气溶胶污染日趋严重,出现日数在大城市区域达到 100~200d 以上,强度也大大增加,能见度可以恶劣到 1~2km,因而出现灰霾一词,指主要由人类活动造成的霾现象,在中国气象局气预函[2005]53 号“关于下发《天气预报等级用语业务规定(试行)》的通知”中已经明确出现“灰霾天气的预报与预警信号”,最新立项的 973 课题中,明确使用大气灰霾是重点研究方向:“大气气溶胶分布、变化及其气候影响。深入认识我国不同区域大气气溶胶

分布与变化特点及区域大气灰霾形成机理,研究关键气溶胶的辐射气候效应,为我国制订相应政策提供科学支撑。”。另外,2006 年 6 月 1 日广东省正式开始发布灰霾预警信号,是省人大批准和省府下文文的。而后粤港澳三方又正式制定了灰霾(烟霞)预警信号发布标准。

在大城市区域目前几乎可以说十霾九灰,以广州为例,在 1950 年代,每年出现霾日 2d,霾日的平均能见度 9.1km;到了 1980 年代,每年出现霾日 116d,霾日的平均能见度下降到 7.9km;到近年,霾日每年仍有 96d,霾日的平均能见度下降到 7.6km;作为对照,雾日的年代际变化不太明显。因而,1980 年代以来大幅增加的霾日,绝大部分是由于人类活动影响的气溶胶细粒子污染造成的。

表 7 广州各年代平均年霾日分布
Table 7 Distribution of annual mean number of hazy days across different decades in Guangzhou

年代	1954~1960	1961~1970	1971~1980	1981~1990	1991~2000	2001~2006
霾日(d/a)	2	1	17	116	141	96
霾日平均能见度(km)	9.1	9.0	8.8	7.9	7.6	7.6
雾日(d/a)	3	9	8	16	22	5

7 灰霾天气与空气质量(空气污染指数 API)

灰霾天气的本质是细粒子气溶胶污染,作者曾经专门讨论过这个问题^[3],能见度与粒子的散射、吸收能力和气体分子的散射、吸收能力有关^[14],主要是与大气粒子的散射能力密切相关,如果简单地将细粒子按照瑞利散射来处理,那么散射光强主要与入射光波长的 4 次方成反比,与粒子体积的平方成正比,而粒子体积与粒子的尺度和浓度有直接关系。如果入射光波长确定,忽略气体和粒子化学成分的影响,影响散射光强的因子就是粒子尺度和浓度了。根据在华南观测的能见度较好时的气溶胶谱资料,10 μ m 粒子的数量大致有 10² 个/m³,2.5 μ m 的粒子有 10⁴ 个/m³,1 μ m 的粒子有 10⁷ 个/m³,0.1 μ m 的粒子有 10¹¹ 个/m³,巨粒子与次微米粒子数量相差 10⁹ 倍,因而能见度的恶化主要与细粒子的数量浓度关系比较大,尤其是出现较重气溶胶污染导致低能见度事件出现时,细粒子的比重会更大。

实际观测了 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的质量浓度,PM₁₀ 有一半月均值超过国家二级标准的日均值浓度限值(150 μ g/m³),而 PM_{2.5} 月均值全部超过美国国家标准的日均值限值(65 μ g/m³),尤其是 10 月至次年 1 月的月均值浓度几乎达到标准限值的 1 倍,细粒子浓度甚高。另外 PM_{2.5} 占 PM₁₀ 的比重非常高,可达 58%~77%,尤其是旱季比雨季更高,这就说明,在珠江三角洲的气溶胶污染中,主要是细粒子的污染,这正是珠三角地区近年来能见度迅速恶化的原因。

作者曾经在华南广大地区分析过气溶胶质量浓度谱,和 15 年前的资料相比较,PM₁₀ 从 117 μ g/m³ 增加到 147 μ g/m³,而细粒子从 54 μ g/m³ 增加到 94 μ g/m³,细粒子的增加远较 PM₁₀ 的增加大得多,15 年来细粒子在气溶胶中的比重有明显增加。

我国在 1982 年建立的空气质量评价体系,仅仅包括 3 种污染物,即 SO₂,NO_x,TSP,在 1996 年调整为 SO₂,NO₂,PM₁₀,而且仅仅以质量浓度来衡量,都不包括细粒子气溶胶,而我国大城市区域的空气污染类型,在短短 30 年中走过了发达国家 200 年的历程,从粉尘污染时代到粉尘污染+硫酸盐污染,再到现在的粉尘污染+硫酸盐+硝酸盐的复合污染时代,25 年前在粉尘污染时代建立的空气质量评价体系,已经远远不能描述复合污染类型,尤其是不能描述细粒子污染的情况了。而美国早就用 PM_{2.5} 来描述细粒子气溶胶,这两年用 PM₁ 来描述细粒子,而影响能见度恶化的气溶胶粒子是比 PM₁ 还要细小的 0.3~0.8 μ m 的细粒子。所以必须建立新的空气质量评价体系,才能描述灰霾天气。而能见度与 PM_{2.5} 尤其是 PM₁ 有非常好的关系,因而目前用能见度来描述灰霾天气是最好的指标。

8 小结

通过进一步的调查和思考,对城市区域区分霾与雾的问题有了进一步的了解,在理论上也找到了依据,这对统一认识,形成一个有一定科学基础,并得到同行认同,统一的区分霾与轻雾或雾的标准有帮助。

(1)在平时已达到饱和的水汽压,对相当于球面的云雾滴来讲就是未饱和的,那样云雾滴就会蒸发;在水汽条件不变时,云雾滴由于蒸发而变小,导致它的平衡水汽压升高,则更易蒸发掉。在不饱和大气中小于数微米的云雾滴必然蒸发,而且伴随着蒸发云雾滴尺度会进一步变小,导致曲率越来越大,蒸发速率越来越快。在地球这样的行星上,云雾滴存在的最小尺度是3~4 μm ,不可能有1 μm 的云雾滴存在。

(2)过去错误认为凝结核可以在低相对湿度情况下产生凝结生成雾滴的观点,是忽视了粒子曲率作用的结果,将实验室大颗粒(常常达毫米量级)的吸湿性特征,延用至次微米粒子造成的。

(3)降温是达到饱和和形成雾滴的即重要又主要的物理过程,云雾是低温下饱和气块的可见标志。在云雾中必然存在凝结或凝华过程,因而必然伴随着潜热释放,这就使云雾内的温度高于环境,在云雾内必然盛行微弱的上升气流,不可能是下沉气流,这些宏观过程在霾层内是不存在的,因而成为识别雾与霾的重要的宏观动力条件。

(4)在对历史资料进行统计时,在排除降水、吹雪、雪暴、沙尘暴、扬沙、浮尘、烟幕、等等视程障碍现象的情况下,通过调试相对湿度,使得雾与轻雾反映自然的年际与年代际气候波动,而霾反映由于人类活动而引起的趋势性变化,其限值大体在90%左右,与美国和英国讨论霾影响能见度的长期变化趋势的研究中使用的相对湿度限值相同,他们都去除了相对湿度>90%的资料,只研究了相对湿度<90%时的能见度变化趋势。进行相对湿度订正才能确保资料的高质量。

(5)近年来由于人类活动大气气溶胶污染日趋严重,在大城市区域目前几乎可以说十霾九灰,1980年代以来大幅增加的霾日,绝大部分是由于人类活动影响的气溶胶细粒子污染造成的。依据上述讨论和以前的研究,给出了霾与雾区分的概念模型,霾与雾观测的标准,和灰霾天气预警信号发布的标准。

[参考文献]

- [1] 吴兑. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论[J]. 气象, 2005, 31(4): 3-7.
Wu Dui. Discussion on difference between haze and fog and warning of ash haze weather[J]. Meteorology, 2005, 31(4): 3-7. (in Chinese)
- [2] 吴兑. 再论都市霾与雾的区别[J]. 气象, 2006, 32(4): 9-15.
Wu Dui. Discussions on the differences between haze and fog in city[J]. Meteorology, 2006, 32(4): 9-15. (in Chinese)
- [3] 吴兑. 关于雨滴在云下蒸发的数值试验[J]. 气象学报, 1991, 49(1): 116-121.
Wu Dui. Numerical test on evaporation of raindrop beneath cloud[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1991: 49(1): 116-121. (in Chinese)
- [4] 盛裴宣, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 322-325.
Sheng Pei-xuan, Mao Jie-tai, Li Jian-guo, et al. Atmospheric Physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003: 322-325. (in Chinese)
- [5] World Meteorological Organization. WMO-No. 266 - Compendium of Lecture Notes for Training Class IV Meteorological Personnel: Volume II - Meteorology (2nd edition) [S]. 1984: 65, 244.
- [6] World Meteorological Organization. WMO-No. 8 - Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (6th edition)[S]. 1996: 1.14-3.
- [7] World Meteorological Organization. WMO-No. 782 - Aerodrome Reports and Forecasts: A User's Handbook to the Codes(4th edition)[S]. 2005: 18, 71, 72.
- [8] Meteorological Office. Observer's Handbook(4th edition)[M]. London: HMSO, 1982: 60, 61, 64, 78.
- [9] Meteorological Office. Meteorological Glossary(6th edition) [M]. London: HMSO, 1991: 116, 145, 189.
- [10] Meteorological Office. Handbook of Aviation Meteorology (3rd edition)[M]. London: HMSO, 1994: 144, 200.
- [11] Malm William C, Derek E Day. Estimates of aerosol species scattering characteristics as a function of relative humidity [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(16): 2845-2860.
- [12] Doyle Martin, Stephen Dorling. Visibility trends in the UK 1950-1997 [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(19): 3161-3172.
- [13] 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[J]. 气象学报, 2006, 64(4): 510-517.
Wu Dui, Bi Xue-yan, Deng Xue-jiao, et al. Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pearl River Delta[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2006, 64(4): 510-517. (in Chinese)
- [14] 戴兵, 罗向东, 唱鹤鸣. 大气气溶胶消光系数的计算方法研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(1): 12-15.
Dai Bing, Luo Xiang-dong, Chang He-ming. Study on calculating method of aerosol extinction coefficients[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(1): 12-15. (in Chinese)

※ 致谢: 感谢香港天文台林沛泗莲高级科学主任和李月婵博士提供 WMO 及其他国际机构各种版本有关霾与雾区别的建
议, 感谢广东省气象局业务发展处的支持, 特此一并致谢。