

低层大气消光系数分布的激光探测

吕达仁 魏重林 海谷淑芳* 施秉钊* 马惠英 张东光

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

利用红宝石激光雷达,并配合同时的太阳光衰减测量,对北京地区晴空低层3公里以下的大气消光系数分布及光学厚度作了定量测量和分类整理,取得了基本资料。

结果说明,在我国不能笼统搬用 Elterman 大气光学模式。对产生差别的原因作了分析,并提出了建立我国自己模式的途径和模式的主要控制因子。

一、引 言

大气消光系数分布是大气的基本光学特性之一。它对于在大气中进行的光学测量和能见度探测等有重要作用。近年来空间技术的迅速发展使光学探测获得了新的巨大生命力,因而需要对大气光学状况系统而详细的了解。另外,近年来环境污染产生的气溶胶粒子改变着大气光学状态,从而局地改变地气系统的辐射收支,它可能对气候变迁产生深远的影响,因而也需要对大气光学状况的了解。由于上述原因,六十年代以来出现了许多大气光学特性分布的观测工作,在观测基础上建立起晴空大气的光学模式,其中以 Elterman^[1,2]在美国观测所总结的模式较为公认,并用以构成别的模式([3]等)。

我国的地表及大气状态有许多特殊性,需要通过我们自己的实地测量,进行分析总结,同时充分利用国外的有用结果,建立起更有代表性的模式。

激光雷达已成为探测大气光学特性的强有力工具。近几年我们对北京地区低层大气消光系数分布作了较多的观测。本文作初步分析。

二、观 测 情 况

在1972年工作的基础上,1973年夏季我们进行了晴空夜晚低层大气消光系数分布与相应时刻的近地温湿层结变化的对比观测。为了进一步了解晴空低层大气的消光系数分布特征,于1975年5—6月和9—11月两段时间里我们又进行了晴空白天低层(主要3公里以下)大气的激光探测,并同时作0.4—0.75 μ 可见光多波段太阳光强观测。将激光观测所得低层大气消光系数分布资料和太阳光观测所得整层大气光学厚度资料结合进行分析。

1976年3月11日收到。

* 北京大学工农兵学员。参加了1973年探测及分析工作。

我们使用的仪器及分析计算方法均与[4]基本相同。各年使用中仪器性能稍有变化,但对结果并无影响。

三、结 果 分 析

1. 晴空 3 公里以下大气消光系数分布的基本结构。

1975 年我们共选择了 45 个晴天进行了 82 次激光观测。根据观测结果可以明显地看出,北京地区晴空低层大气有三种不同的状态,对应着三种不同类型的消光系数分布,结果见图 1。作为比较,图中还绘出了几组波长为 0.70μ 的 Elterman 模式分布(以下简称 E 模式)。

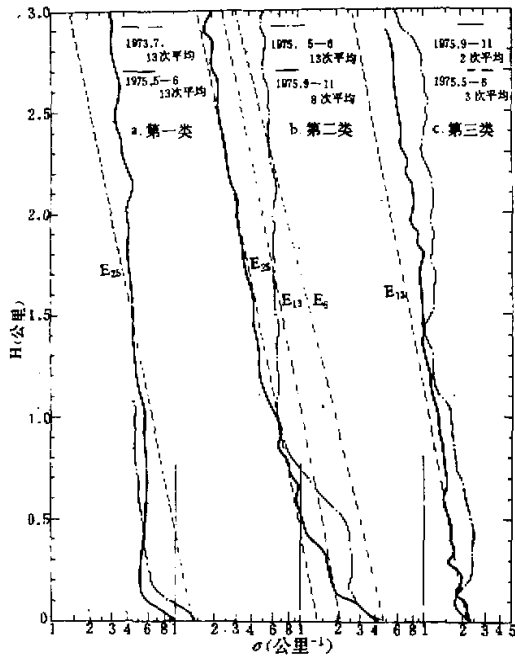


图 1 各类晴空状态 σ 垂直分布的平均探测结果

第一类为强冷空气刚移入本站,即冷锋后极晴朗天气。这时的地面能见度往往在 50 公里以上(关于能见度确定可参阅[5]),远山清晰可见,天空呈深蓝色。这类大气消光值是最小的。图 1c 实线为 1975 年 5—6 月这类大气状态的 13 次白天探测平均分布,折点线为 1973 年 7 月傍晚及夜间 13 次探测平均分布。可以看出其特点为:

(1) 3 公里以内整层消光系数数值都很小,其分布十分接近指数衰减分布,即具有

$$\sigma(z_2) = \sigma(z_1) e^{-\frac{(z_2 - z_1)}{H_0}}$$

这样分布形式,在半对数坐标上形成一条直线。

(2) 上下层分布比较均匀,仅在地面至 150 米高度存在消光系数的陡降,形成明显的两截指数分布,其衰减高度 H_0 分别约为 3.73 和 0.22 公里。底部的 σ 陡降显然是由于地面气溶胶源的垂直输送受到稳定层的抑制而造成的,而上部的结构显然是这类大气状态的固有特点,或者说是这种气团的固有光学属性。

(3) 与 E 模式相比,北京夏季洁净大气的 H_0 值远较 E 模式 ($H_0=1.33$ 公里)为大,即消光系数随高度减小很慢,3 公里高度 σ 平均值较 E 模式值大 2 倍以上,而在 1.5 公里以下 E 模式值又明显地较实测平均值为大。应该指出,我们的探测平均与 E 模式的偏离是长时间的、系统的,是我们 1972 年开始观测以来一直发现的稳定特点。

第二类为具有明显的近地逆温状态的静稳大气。这类天气往往近地浑浊有雾,地面能见度在 2—15 公里,以 6—10 公里居多,天空呈灰白色。激光所测这类大气消光系数平均分布有如下特点:

(1) 逆温结构所造成的近地消光系数分布具有明显的日变化。一般是从清晨到午后,逆温高度逐渐抬升,强度则减弱直至消失。在这一过程中,低层 3 公里及整层大气的消光系数都有逐渐增大的趋势,而地面能见度的变化则开始由好变差,在中午前后又开始变好,这种地面能见度和大气光学厚度的非同步变化是十分值得注意的特点。它清楚地说明不能简单地用地面能见度值来确定上空的消光系数分布与光学厚度,必须考虑大气层结。

图 2 为 1975 年 5 月 14 日近地 3 公里消光系数分布的变化情况。可以看出逆温造成的 σ 突变高度从清晨的 200 米逐步抬升到 10 时左右的 700 米,以后维持在此高度直至午后 14 时消失。图中还算出了各时刻的光学厚度 τ_0^3 和 τ_0^0 ,分别表示 3 公里和整层大气值。

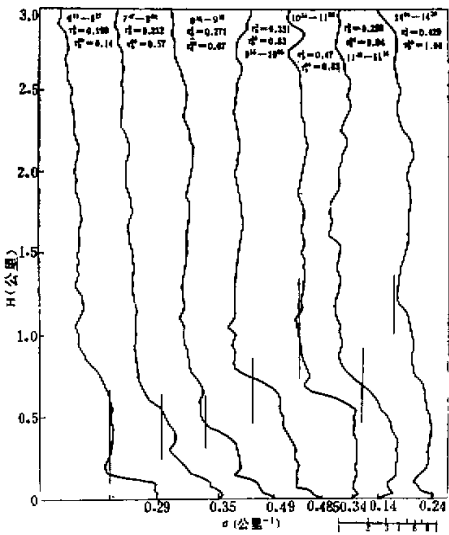


图 2 静稳晴天 σ 分布日变化过程示例。1975 年 5 月 14 日探测结果。 σ 用对数坐标,标尺见右下方。横坐标下标出各次探测 σ 地面值。各竖线为该次探测的 $\sigma=0.1$ 公里 $^{-1}$ 等值线。

晴天夜晚随着大气层结的变化,消光系数结构的演变也是相当典型的。一般随日落而产生地面逆温,逆温强度及逆温顶高度在整夜逐步增大,相应地在逆温顶以下 σ 值增大,在逆温顶以上,由于下部粒子的垂直输送受到抑制,层结稳定,因而大气净化,一般 σ 值会减小,随高度的减小也会明显一些。图3为1973年7月13—14日夜间的消光系数分布的变化。图下还绘出了相近地温度层结(一部分由近测站处系留气球测得,一部分由北京气象台探空测得)和湿度层结(北京气象台探空记录)。这里值得注意的是当近地水汽丰富,相对湿度大的时候容易在夜晚产生水汽凝结现象,从而使 σ 分布产生复杂的现象。这在北京夏季夜晚是较多见的。对于这类情况我们1973年的观测已有充分证实,需要作另外的专门分析。图3中04时近地有明显的水汽凝结现象,使 σ 分布大为复杂即为一例。

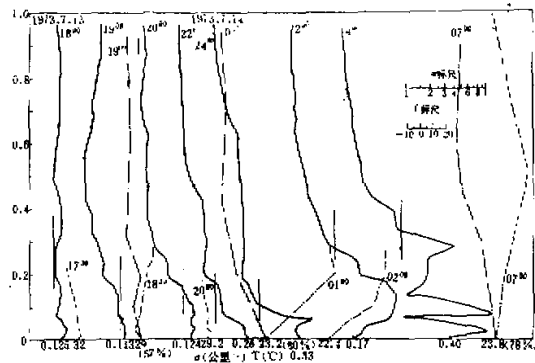


图3 晴空夜晚 σ 分布与相应的温度层结日变化过程示例。1973年7月13—14日夜探测结果。图中 σ (公里 $^{-1}$)和 T ($^{\circ}\text{C}$)按时间次序混合绘出,标尺见右上方。各直线为相应时刻 $\sigma = 0.1$ 公里 $^{-1}$ 的等值线。横坐标下标出各时刻 σ 和 T 的地面值。——为相对湿度层结,括号内为地面相对湿度值。

(2) 平均 σ 分布具有明显的逆温层结影响。图1b中绘出了1975年两个时段该类状态下的 σ 平均分布。可以看出夏季低层逆温影响可达1公里,强烈影响500米以下的 σ 分布,而在1公里以上 σ 符合很好的指数分布, $H_0 \approx 5.5$ 公里,比第一类的 H_0 值还大一些,而且 σ 绝对值在各高度上均明显较第一类状态为大。秋冬季逆温的平均影响达600米左右,在此以上 σ 亦很符合指数分布, $H_0 \approx 1.4$ 公里,远较夏季为小。若下部受逆温影响的 σ 分布亦用指数衰减近似,则 H_0 值在夏季和秋冬季分别为0.55和0.40公里。

(3) 和E模式的比较。图1b中还绘出了几个地面能见度情况下的E模式分布。可以看出,就3公里总体而言,任何一种E模式分布都与北京地区的实际平均不符,两者的差异是系统的、明显的、唯一有意思的是秋冬600米以上 σ 平均分布与晴空大气E模式极为吻合。这就证明E模式在描述低层大气光学特性时具有明显的局限性。特别在逆温高度下两者差异更明显。

第三类为晴天近地逆温破坏后的低层充分混合大气状态。这类状态一般出现在静稳晴天后14—16时。这类状态,常常是整层大气浑浊,但地面能见度反较第二类为好,约以15—20公里居多。图1c为这种状态下的 σ 平均分布。由于观测次数少,代表性可能

受些影响。这类状态 σ 的分布特点为:

(1) 整层 σ 值较大,上下交换充分,混合均匀。

(2) 整层呈明显的指数分布, H_0 值在夏季和秋冬季分别为 2.68 和 2.41 公里。值得注意的是,两时段 H_0 值相当接近,说明在这种状态下对分布起作用的不仅是该气团原有粒子,而更重要的是地面粒子的垂直输送,促进上下层均匀混合。

(3) 与 E 模式相比,无论 σ 值及光学厚度值均较同能见度下的 E 模式值为大。

2. 各层光学厚度及其比较

表 1 列出了夏、秋两时段三类大气状态下近地 1 公里、3 公里及整层大气的光学厚度平均值 τ_0^1 、 τ_0^3 及 τ_0^σ 。其中 τ_0^1 和 τ_0^3 由激光观测资料求得, τ_0^σ 为同时进行的 $\lambda=0.6980\mu$ 的太阳光强观测推算值^[6]。为使两者能更好作比较,我们除列出各自的平均值外,还列出了观测时刻完全相同的观测结果平均值,表中凡属平均次数相同的项即属这种情况。由于观测上的原因,我们主要分析夏季结果,表中还列出了三个能见度下的 E 模式相应值($\lambda=0.70\mu$)。表 2 列出了二、三类与第一类大气状态光学厚度的比较值。

表 1

类 别	τ_0^1		τ_0^3		τ_0^σ		τ_0^1/τ_0^3		τ_0^1/τ_0^σ		能见度 S_0 公里
	次	平均值	次	平均值	次	平均值	次	平均值	次	平均值	
一 夏	13	.056	13	.136	9	.312	13	.413	9	.445	30—50
二 总 夏 秋	36	.198	36	.321	27	.628	36	.617	16	.442	以 6—10 为主
	16	.162	16	.282	16	.635	16	.576			
	8		8	.214	8	.233*					
三 总 夏	5	.185	5	.375			5	.500			~15
	2	.187	2	.349	2	.78	2	.485	2	.595	
E	25			.169		.258					25
	13			.263		.359					13
	6			.493		.594					6

* 此值明显偏小,与观测原因有关。

从表中所列可以看出,夏季第一类大气状态低层光学厚度很小,特别是 τ_0^1 数值仅为晴空 E 模式值的一半,但 τ_0^3 就接近 E 模式值,而 τ_0^σ 则明显地较 E 模式值大 20% 之多。二、三两类 τ_0^1 值较接近, τ_0^3 则三类明显大于二类。这当然是由于第三类有利于气溶胶垂直输送的缘故。和 E 模式值相比则三个 τ 值均较同能见度下的 E 模式值为大。

特别是第三类状态,平均能见度约 15 公里,而 τ_0^σ 约为 E 模式值的 2 倍。从各层光学厚度的比值看 τ_0^1/τ_0^σ 对第一、二类均低于 50%,第三类约 60%。而 E 模式中该比值在 25、13、6 三个能见度下分别为 65%、73% 和 83%。两者的差异很大。

从表 2 中各类之间的相互关系看,二、三类很接近,而第一类大气透明度大大优于其余两类。二、三类之间的差别在于第三类上层 τ 值较大,而 τ_0^1 值反而较小。

表 2

参数 比较类别	τ_0^1	τ_0^3	τ_0^σ
二/一	3.55	2.36	2.20
三/一	3.31	2.57	2.50

3. 地面能见度和垂直光学的关系

表1右端一项为各类状态平均能见度,从表看出一类和二、三类能见度有明显的差别,而各项 τ 值也反映出明显的差别。在这一意义上看,能见度对确定层光学厚度有意义。但从二、三类比较,则数值相近而趋势相反。

为了进一步考察这种关系,我们将各次观测的水平能见度与 τ_0^1 作图看其相关。图4即为各次观测 S_0 - τ_0^1 图,图中 $\circ$ 点为E模式值外推至能见度100公里的情况。在高能见度时,由于在[5]中已述的原因,我们将所测 σ_0 按能见度公式换算的 S_0 值绘于图上。总的看观测点很离散,特别是第二类。而第三类有明显趋势,系统地比E模式值偏高。第二类的离散在于没有考虑逆温层结引起的气溶胶近地堆积,而第三类的系统偏高显然是由于近地气溶胶的充分垂直输送引起的。

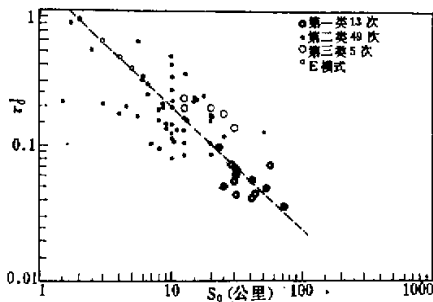


图4 τ_0^1 和 S_0 的对应关系

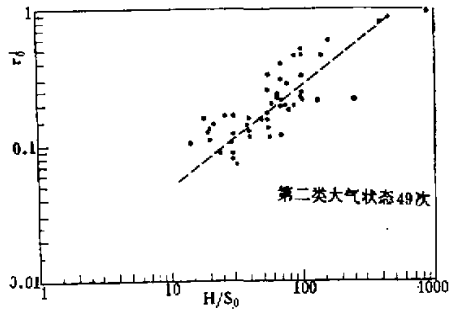


图5 τ_0^1 和 H/S_0 的对应关系

为了考察逆温层结的作用,对第二类观测点我们又作了 τ_0^1 和 H/S_0 相关图(图5), H 为气溶胶堆积层高度, $S_0 \propto 1/\sigma_0$,因而 H/S_0 反映堆积层高与地面 σ_0 的乘积。从图中看出观测点的离散情况有所改善,反映出比较明显的趋势。

四、小结和讨论

通过观测和分析,我们可以得到如下几点初步看法。

1. 北京地区晴天大气消光系数分布无论在数值上和结构特点上都和公认的 Elterman 模式有较大的区别。消光系数分布与光学厚度值还具有明显的季节性,同时又受近地逆温层结生消的强烈影响。夏季北京上空消光系数明显较E模式值大,随高度衰减慢,反映上空粒子较多,而秋冬上空较接近E模式分布。逆温破坏后则整层 σ 值均明显增大。这些基本数据及特点已为几年来的激光探测不断证实,它可以部份代表北京这样的华北平原地区的基本特性。

2. 从激光和太阳光强的综合观测结果和和E模式的比较可以看出,只在少部分情况下E模式有一定代表性,大部分情况下是不适用的。其原因前面已略有所述,主要在于该模式缺乏低层实际探测数据,取资料点为沙漠性气候,另外它的探测限于无月光的暗夜。由于这三方面的局限,势必限制该模式的真实代表性。实践表明,我们需要建立更符合实际情况的模式。而要做到这一点,首先一定要掌握包括低层大气在内的整层大气情况,而

对大气又要抓住地面能见度和逆温层高度这两个主要因子。只有在充分总结这方面探测资料的基础上才能建立起符合实际的基本光学模式。这是一项我们发展空间光学侦察、探测工作中应予重视的基本项目。

3. 几年来用激光雷达探测大气消光系数分布,特别是1975年与同时的太阳光强观测的综合对比表明,激光雷达不但可以定性了解大气各层的浑浊情况,而且可以获得基本可靠的定量结果。充分利用激光雷达这一强有力的探测工具,系统地取得大气消光系数的分布资料,将为建立可靠的大气光学模式提供坚实的基础。

参 考 资 料

- [1] L. Elterman, UV, Visible and IR Attenuation for Altitudes to 50km, AFCRL-68-0153, 1968.
- [2] L. Elterman, Vertical Attenuation Model with Eight Surface Meteorological Ranges 2 to 13 Kilometers, AFCRL-70-0200, 1970
- [3] R. A. McClatchey, et. al., Optical Properties of the Atmosphere (Revised), AFCRL-71-0279, 1971.
- [4] 激光在气象探测中的应用,中国科学院大气物理研究所集刊,第1号,科学出版社,1973, pp. 32-42.
- [5] 吕达仁、魏重、张健国,激光探测能见度的实验研究,大气科学,1976,第1期。
- [6] 林海、魏重,北京地区太阳可见光辐射与大气透明度的初步测量,大气科学,1976,第2期。