

气象能见度与望远光度计

毛节泰 李建国

(北京大学地球物理系)

提 要

本文讨论了在实际工作中用柯什密得能见度公式推算大气消光系数时可能发生的误差。分析表明,由于目标物不是黑体,一般可使消光系数增大10%,但用望远光度计并采取一些适当措施,可把这一误差大大减小。而由于天空云造成光路上大气散射的非均匀性所引起的误差却难于消除。

大气尘的性质与含量是决定气象能见度的主要因子。随着城市和工矿地区污染程度的加重,大气尘的含量大量增加,引起了能见度的急剧下降。能见度好坏已成为环境污染情况的一种重要指标。从污染监测这一目的出发,能见度问题又重新受到极大的重视,希望从能见度观测着手,能推断大气尘的特性。

关于能见度的理论最早是由柯什密特(1924)提出的, Middleton (1952) 又对这一理论进行了系统的研究。柯什密特给出在大气水平均一的条件下,气象能见距 R 和大气消光系数 β_{ex} 之间有一个简单的关系

$$R = 3.91/\beta_{ex}. \quad (1)$$

这便是著名的柯什密特能见度公式。它在能见度的观测工作中广泛地被采用,几乎成了测量气象能见距的理论基础:一方面利用对大气消光系数的测量来客观地决定气象能见距;另一方面也从能见度的观测资料来估计大气的消光系数。

然而柯什密特公式是有严格的限制条件的。由于很多观测场合并不满足这些条件,利用这种资料来估计大气消光系数就成为问题。当把能见度当作环境污染监测的一个项目时,这种误差就更需要仔细地进行考虑。最近国外已有不少工作对这些问题进行分析^[1,2]。本文将在引入对比度传输系数这一概念的基础上,对这些误差进行简单的讨论。

望远光度计是近年来广泛用于能见度测量的仪器之一^[3]。和大部分能见度测量的仪器不同,望远光度计直接测量目标物及其背景的视亮度,然后利用对比感阈的概念来计算能见距,从而避免了使用(1)式所带来的问题。本文也将介绍北京大学地球物理系试制的望远光度计,及其在能见度观测中的应用。

一、气象能见度的基本理论

为了把某一目标物从其背景中辨认出来,一般要求目标物和背景之间有足够大的差

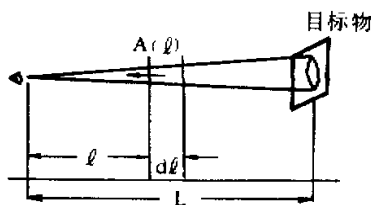


图 1 计算能见度示意图

异. 对观测远处目标物而言, 这主要是指亮度之间的差异, 并可用亮度对比 C 来定量地描述,

$$C = \left| \frac{B - B'}{B'} \right|. \quad (2)$$

这里 B 和 B' 表示在目标物位置上, 目标物和背景本身的亮度. C 称为目标物的固有对比.

当通过一段大气路程 L 观测时, 实际可以看到的是目标物和背景的视亮度(图 1). 大气对视亮度的影响包括消光和散射两个方面, 有

$$\begin{aligned} B_L &= B \cdot T_L + D_L \\ B'_L &= B' \cdot T_L + D_L \end{aligned} \quad (3)$$

其中 T_L 为 L 这段大气路程的透明度, D_L 为在观测的角锥之内这段大气路程的亮度. 观测到的视亮度对比

$$C_L = \left| \frac{B_L - B'_L}{B'_L} \right| = \left| \frac{B - B'}{B'} \right| \cdot \left(1 + \frac{D_L}{B' \cdot T_L} \right)^{-1} = C \cdot Y \quad (4)$$

其中 $Y = \left(1 + \frac{D_L}{B' \cdot T_L} \right)^{-1}$ 称为对比度传输系数, 它反映这段大气路程对对比度减小的影响.

在一般情况下,

$$T_L = \exp \left[- \int_0^L \beta_{ex}(l) dl \right] \quad (5)$$

$$D_L = \int_0^L A(l) e^{-\int_0^l \beta_{ex}(l') dl'} dl. \quad (6)$$

这里 $A(l)$ 为观测的角锥中单位距离的气柱向观测方向发射的散射光亮度. 在很多观测工作中, 衬托目标物的背景是天空, 这时

$$B' = \int_L^\infty A(l) e^{-\int_L^l \beta_{ex}(l') dl'} dl \quad (7)$$

这时对比度传输系数为

$$Y = \frac{\int_L^\infty A(l) e^{-\int_0^l \beta_{ex}(l') dl'} dl}{\int_0^\infty A(l) e^{-\int_0^l \beta_{ex}(l') dl'} dl}. \quad (8)$$

(8) 式是一个普遍的表达式, 适用于以天空为背景对目标物进行观测的场合, 包括水平和非水平的情况。

按气象能见度的规定, 观测者选择水平方向的黑体作为目标物并以其相邻的天空作为背景, 这时 $C = 1$, 当水平均一的条件得到满足时, 便可推出柯什密特公式(假定人眼的对比感阈为 0.02)。

因此在导出 (1) 式时已经引入了几个假定:

- 1) 水平均一, β_{ex} 为常数;
- 2) 水平均一, $A(i)$ 为常数;
- 3) 以天空为背景的黑体目标物, $C = 1$;
- 4) $\varepsilon = 0.02$ 。

以下分别讨论由于这些条件得不到满足所带来的误差。

1. 目标物非黑体 设 $B = \zeta B'$, 由 (2) 式可知, 随 ζ 的变化, C 将作线性的变化。这一变化虽不影响对比度传输系数, 但却使视亮度对比发生变化。对于实际消光系数为 β_{ex} 的大气, 如果用黑体作为目标物, 测到的气象能见距为 R , 这时有

$$\varepsilon = Y(R) = e^{-\beta_{ex} \cdot R}, \quad (9)$$

但若目标物不是黑体, 则测出的能见距 R' 为

$$\varepsilon = CY(R') = Ce^{-\beta_{ex} \cdot R'} \quad (10)$$

故

$$R' = \beta_{ex}^{-1} \ln \frac{C}{\varepsilon}. \quad (11)$$

若不考虑目标物非黑体这一因子, 简单地把能见距代入 (1) 式去计算大气消光系数, 则算出之消光系数 β'_{ex} 和 β_{ex} 之比为

$$\frac{\beta'_{ex}}{\beta_{ex}} = \frac{\ln \varepsilon}{\ln \varepsilon - \ln C} \quad (12)$$

图 2 给出随着 ζ 的变化, 固有对比 C 以及相应的 β'_{ex}/β_{ex} 之变化。从图中可以看出, 除非对非常亮的目标物 ($\zeta > 2$), β'_{ex} 值一般都大于 β_{ex} 值。当目标物亮度不超过背景亮度 30% 时, 其误差不大于 10%。

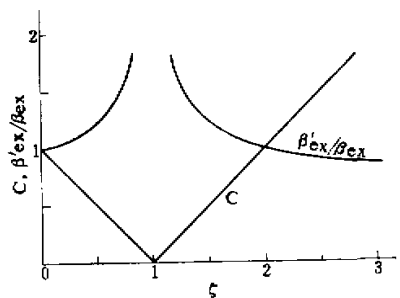


图 2 目标物非黑体对固有对比与消光系数的影响

2. 大气消光系数非均匀 如果观测光路通过一段非均匀的大气, $\beta_{ex}(l)$ 将要发生变化, 这时 $A(l)$ 一般也要发生变化. 如果认为 $A(l)$ 和 $\beta_{ex}(l)$ 之间始终能保持正比关系(例如光路上大气尘的性质相同, 但浓度不均匀), 则可以证明, 若观测的目标物仍然是以天空为背景的黑体, 有:

$$Y = \exp \left[- \int_0^L \beta_{ex}(l) dl \right] = T_L.$$

故能见距的观测可提供这段路程的平均消光系数

$$\bar{\beta}_{ex} = \frac{1}{L} \int_0^L \beta_{ex}(l) dl.$$

注意, 在这一情况下并不限制要水平光路, 因此它也可以用于非水平的场合.

3. 由于非均匀照明而引起散射光亮度非均匀 这时沿光路的大气是均匀的, 但由于有云, 部分光路的太阳直接辐射被阻挡了, 这些阴影部分的散射光就会显著减小(图3). 当云处于不同部位, 这种减小将影响到气柱亮度 D_L (当云处于观测者和目标之间) 或背景亮度 B_L (当云处于目标物以远). 如果被阻挡部分的散射光亮度为 $A_{\Sigma}(l) = \phi A(l)$, 并假设光路本身是均匀的, 则

$$Y' = \begin{cases} e^{-\beta_{ex}L}/(1-\Delta) & r+a < L \\ (e^{-\beta_{ex}L} - \Delta')/(1-\Delta) & r < L < r+a \\ (e^{-\beta_{ex}L} - \Delta)/(1-\Delta) & r > L \end{cases} \quad (13)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta' &= (1-\phi)[e^{-\beta_{ex}L} - e^{-\beta_{ex}(r+a)}] \\ \Delta &= (1-\phi)[e^{-\beta_{ex}r} - e^{-\beta_{ex}(r+a)}], \end{aligned} \quad (14)$$

a 为云块直径. 因此由于非均匀照明而引起光路上散射光亮度非均匀时, 对比度传输系数将要改变. 图4给出当 $L=10$ 公里, $\phi=0.4$, $a=2$ 公里, β_{ex} 取 0.1, 0.391 和 1 公里⁻¹ 时, Y' 和均匀照明时的对比度传输系数 Y 之比值随云位置 r 的变化. 从图中可以看出, 当云处于观测者和目标物之间时, 对比度传输系数将要加大, 使能见度变好, 这是因为气柱亮度减小了. 而且从图中也可以看出, 云块位置越靠近观测者, 能见度将越好. 当大气消光系数数值较大时, 这一作用尤为明显. 反之, 当云处于目标物以远时, 对比度传输

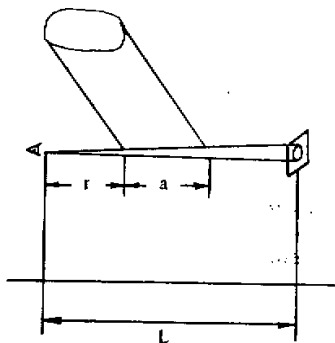


图3 由于云造成气柱散射之非均匀

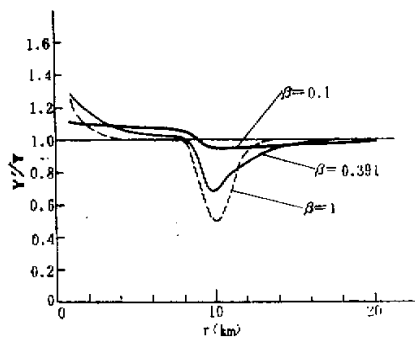


图4 不同位置的云对对比度传输系数的影响

系数将要减小,这是因为背景亮度减小了.而且云块位置越靠近目标物,大气消光系数值越大,这一作用越明显.

如果用有云天气的能见距资料,简单地按(1)式去反推大气消光系数,则消光系数也将和实际情况不同,类似图2的分析表明,这一因子也将造成约10%的误差.

4. 大气尘吸收的影响 如果大气尘对某些波长的光有吸收,则

$$\beta_{rx} = \beta_{sc} + \beta_{ab} \quad (15)$$

其中 β_{sc} 和 β_{ab} 分别为散射系数和吸收系数. 假设有 $A(l) = \eta\beta_{sc}(l)$, η 为一常数,则由(8)式

$$Y = \frac{\int_{L_0}^{\infty} \beta_{sc} e^{-\int_0^l \beta_{rx} dl'} dl}{\int_0^{\infty} \beta_{sc} e^{-\int_0^l \beta_{rx} dl'} dl} \quad (16)$$

当光路是均匀的, Y 值将没有变化,从能见度观测可算出 β_{rx} . 即使光路不均匀,但只要 $A(l) = \eta\beta_{sc}(l)$ 这一关系继续满足,并且吸收在总消光中所占的比重 ($\bar{\omega}_0 = \beta_{sc}/\beta_{rx}$) 不变,则仍然可以测到这条光路上的平均消光系数.

综合以上分析可以看出,由于目标物非黑体,可能产生不大于10%的误差,非均匀的照明当云体为光路的20%左右时,最大也产生10%的误差. 当光路上大气并不均匀,但只要 $A = \eta\beta_{sc}$ 这一关系得到满足,还是能测到正确的平均消光系数,即使大气尘有吸收,也没有影响.

二、望远光度计用于能见度的观测

望远光度计是近年来广泛用于能见度观测的一种仪器,其主要结构是一个装有光电探测器的望远镜. 图5是其结构图. 物镜 M 为一焦距300毫米的单透镜,它将远处景物成象于焦平面 P , 并通过小孔 H 进入测量系统. 小孔的直径为1毫米,整个仪器的视场角为12分. 通过 H 的光流经目镜 M' 形成平行光, 透过干涉滤光片 F 后为光电倍增管 D 所接收, 滤光片盘 F 上装有八块干涉滤光片,其特性如表1所示. 盘 F 由一小电机带动以每分钟一转的速度旋转,轮流测量不同波长的亮度. 仪器箱的侧边开有观察孔,以便直接观测到小孔 H 瞄准目标物的情形. 整个仪器架设在一个方位和仰角可调的支架上.

用望远光度计可测量目标物和背景的视亮度,从而推算出视亮度对比 C_L . 如果目标

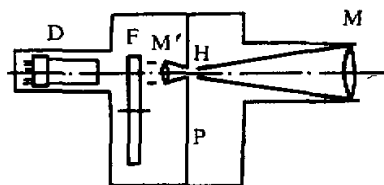


图5 望远光度计结构原理

表 1 干涉滤光片特性

通道数	1	2	3	4	5	6	7	8
中心波长 (nm)	4048	5000	5940	7195	7620	8815	9340	1006
半宽度 (Å)	105	110	75	135	115	100	140	205
通过率 (%)	50.5	52	67	47.5	52	57	54	52

物为黑体, 背景为天空, 且假设大气水平均一, 则消光系数

$$\beta_{ex} = -\frac{1}{L} \ln \left| \frac{B_L - B'_L}{B'_L} \right|. \quad (17)$$

但考虑到目标物并非黑体, 选用相同方向上不同距离的两个类似反射特性的目标物, 分别测出其视亮度 B_{L_1} 和 B_{L_2} 以及天空背景亮度 B'_L , 则

$$\begin{aligned} C_{L_1} &= C \cdot Y_1 = C \cdot e^{-\beta_{ex} L_1} \\ C_{L_2} &= C \cdot Y_2 = C \cdot e^{-\beta_{ex} L_2} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\beta_{ex} = \frac{1}{L_1 - L_2} \ln \left| \frac{B_{L_2} - B'_L}{B_{L_1} - B'_L} \right|. \quad (19)$$

测量时望远光度计按装在北京大学物理大楼六楼平台。目标物是离测量点 730 米和 30 米的灰色砖墙, 墙面朝东, 下午没有太阳直接辐射照射, 故每天 14:00 定时观测, 并记录与海淀气象站(离测站一公里)的能见度记录进行比较。

一共观测了 16 组资料。图 6 是望远光度计观测的能见距(用波长为 $0.5 \mu\text{m}$ 的消光系数算出, 下同)和海淀气象站能见度之相关。虽然两种方法所测的值并不一致, 有些记录相差达 100%, 但总体上可以找到较好的线性相关关系。显然为了要使目视观测结果与器测结果一致, 还要进行相当多的工作。

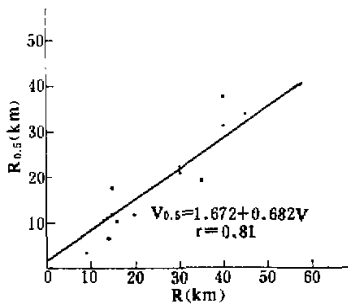


图 6 用望远光度计计算出之能见距 $R_{0.5}$ 与海淀气象站能见度资料的相关

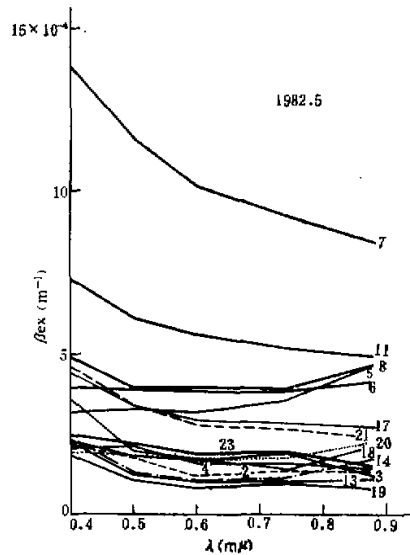


图 7 消光系数随波长之变化

望远光度计的另一个好处是可以进行多波段的观测而不必对仪器进行绝对标定, 因此可用于测量大气消光系数光谱。图 7 给出所测得 16 次观测的大气消光系数光谱。从

图中可以看到, 5月7日消光系数的数值最大, 但它随波长的递减也最快, 这表明大气中含有大量的小粒子. 5月3日、13日、19日等天消光系数值较小, 且随波长变化不大, 表明粒子浓度不大但半径较大. 利用 Heintzenberg 等^[4]建议的随机最小二乘法对这些资料进行反演, 得出粒子谱分布基本上和上述推论一致.

在上面的讨论中, 我们选用两个特性相同的目标物, 意在消除由于目标物固有亮度不等于零所带来的误差. 当这两个目标物特性不全相同, 造成这两个目标物的固有对比不相同, 则在计算 β_{ex} 时, (19) 式应当为

$$\beta_{ex} = \frac{1}{L_1 - L_2} \left[\ln \left| \frac{B_{L_2} - B'_{L_2}}{B_{L_1} - B'_{L_1}} \right| + \ln \frac{C_1}{C_2} \right] \quad (20)$$

故

$$\frac{\Delta\beta_{ex}}{\beta_{ex}} = \frac{\ln \frac{C_1}{C_2}}{(L_1 - L_2)\beta_{ex}}, \quad (21)$$

而

$$C_1/C_2 = \frac{B_1 - B'}{B_2 - B'} = \frac{1 - \frac{B_1 B_2}{B_2 B'}}{1 - \frac{B_2}{B'}}.$$

若 $B_1/B_2 = 0.9$, $B_2/B' = 0.2$, $L_1 - L_2 = 700$ 米, $\beta_{ex} = 4 \times 10^{-4}$ 米⁻¹, 则

$$\Delta\beta_{ex}/\beta_{ex} = 0.088.$$

因此为了减小误差, 应尽量使两个目标物的特性(包括反射特性和照明条件)相同, 同时目标物也应尽可能地接近黑体, 使其固有亮度远小于天空背景的亮度. 从 (21) 式也可以看

出, 对于选定的目标物, $\Delta\beta = \frac{\ln \frac{C_1}{C_2}}{L_1 - L_2}$ 几乎是常数, 故当消光系数大时测量的相对误差较小. 如果要在消光系数较小时进行测量, 则目标物 1 应选择远一些. 最后, 当目标物被阳光直接照射使其亮度很大时(即 B_2/B' 很大), 测量的误差也将很大, 故我们观测选取目标物处于背阴的条件下进行.

三、结论和讨论

从上面的分析可以得出下述结论:

(1) 利用柯什密特公式从能见度来推算大气消光系数是有一定条件的, 在应用时宜对此进行仔细的考虑.

(2) 由于目标物非黑体可能引入 10% 的误差(当 $\zeta < 0.3$ 时), 用望远光度计作双目标物观测时原则上可以消除这一误差, 但对目标物的选择有一定的要求.

(3) 只要大气柱的散射光亮度能保持和消光系数成正比关系, 则无论大气是否均匀或有无吸收, 都不影响平均消光系数的测量.

(4) 当天空有云使一部分光路上太阳直接光被阻挡时, 测量的消光系数值会发生变

化。当云块在观测者或目标物附近时, 这一影响尤为明显。若云块尺度不大于能见距的 20%, 这种误差可保持在 10% 以内, 更大的云块会带来更大的误差。这一因素无法用理论或实验的方法来消除, 因此能见度观测应尽量避免这一情形。

参 考 文 献

- [1] Horvath, H., Atmospheric Visibility, *Atmos. Env.*, 15, 1785—1796, 1981.
- [2] Roessler, D. M. and Faxvog, F. R., Visibility in Absorbing Aerosols, *Atmos. Env.*, 15, 151—155, 1981.
- [3] Horvath, H., The University of Vienna Telephotometer, *Atmos. Env.*, 15, 2537—2546, 1981.
- [4] Heintzenberg, J., Müller, H., Quenzel H. and Thomalla, E., Information Content of Optical Data with Respect to Aerosol Properties: Numerical Studies with a Randomized Minimization-Search-Technique Inversion Algorithm, *Appl. Opt.*, 20, 1308—1315, 1981.

VISIBILITY AND TELEPHOTOMETER

Mao Jietai Li Jianguo

(Department of Geophysics, Beijing University)

Abstract

In this paper, the error in estimating the atmospheric extinction coefficient from the observed data of visibility in terms of Koschmieder visibility formula has been discussed. It has been shown that the extinction coefficient may be overestimated about 10% owing to the non-black body targets. This error can be reduced by using a telephotometer. But the error caused by the inhomogeneous scattering of the atmosphere is hardly to be eliminated.