

文章编号: 0253-2239(2010)09-2486-07

# 大气中的视觉和大气能见度

饶瑞中

(中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 表征大气对视觉影响的物理量是大气能见度,该物理量的具体定义在各种应用领域和研究文献中是比较混乱的。在气象领域,水平大气能见度已成为常规观测量。航空应用领域常常涉及到的斜程大气视线路径的能见度问题一直没有统一的标准。以物体与背景亮度的对比度为研究对象,详细探讨了大气中的视觉问题,澄清了水平能见度的概念,从辐射传输方程出发研究了斜程大气能见度问题,给出了典型大气条件下斜程大气能见度的基本特征,特别比较了向上和向下观察时能见度的区别。

**关键词** 大气光学;大气能见度;视觉;辐射传输;斜程能见度

**中图分类号** TN241 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103009.2486

## Vision Through Atmosphere and Atmospheric Visibility

Rao Ruizhong

(Key Laboratory for Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** The physical quantity describing atmospheric effect on vision is visibility. The definitions of visibility have been diverse in different application areas and scientific literatures. Horizontal visibility was measured routinely in meteorology. There has been no standard visibility definition for slant path vision which is frequently occurred in such areas as aeronautics. Based on the radiance contrast between object and atmospheric background the problem on vision through atmosphere is discussed. Definition of horizontal visibility has been clarified. The slant path visibility has been solved based on the radiative transfer equation. The general characteristics of the slant path visibility under model atmosphere are presented, and emphasis is paid on the difference between up-looking and down-looking visibility.

**Key words** atmospheric optics; atmospheric visibility; vision through atmosphere; radiative transfer; slant-path visibility

## 1 引 言

在大气中人们的视觉能否清晰地感知物体取决于多种因素,包括人眼的视觉能力;物体距观察者的距离;物体的物理特性,如大小、形状、色彩;背景的物理特性;照明的情况;大气的特性等。在一定的观察距离上,物体的色彩、亮度与背景的对比度(它们都与距离有关)是感知物体依据的主要物理因素。在观察遥远物体时,具有决定作用的是亮度差异。因此,大气中的物体能见度理论研究都是基于亮度对比的概念。

由于大气介质(包括分子和气溶胶粒子)的散射造成的天空背景光形成了白天和黑夜的区分。随着天气条件和太阳位置的变化,天空亮度也随之变化,进而影响大气中物体与背景的亮度对比,在同样位置的一个物体的可视程度也发生改变。

对这类问题的处理,有早期的基于基本物理过程的启发式分析,研究结果在均匀视线路径的能见度问题等方面发挥了重要作用<sup>[1~5]</sup>。而对于非均匀视线路径的相关问题,从辐射传输方程入手求解则更为简便明了<sup>[6]</sup>。描述天空亮度的基本物理量仍然

收稿日期: 2009-11-17; 收到修改稿日期: 2010-01-07

作者简介: 饶瑞中(1963—),男,博士,研究员,主要从事大气湍流和激光传输等方面的研究。E-mail: rao@aiofm.ac.cn  
(中国光学学会会员号: S0404207915)

使用光谱辐射亮度  $I_\lambda$ , 为简化起见, 本文略去表示波长的下标符号。

## 2 均匀大气中的视觉问题

大气中一个物体被天空光(包括太阳光和漫射光)照明并被人们视觉感知的过程如图 1 所示。定义自眼睛向物体的直线方向为视线方向, 物体向眼睛的方向为视线反方向。在可见光谱区间, 如果物

体自身不发光, 则物体本身的固有亮度( $I_{obj}$ )来自太阳光和全空间所有方向的天空漫射光(光谱辐射亮度为  $I_{III}$ )在物体上向视线反方向的漫反射。当眼睛离开物体一定距离观察时, 物体本身的固有亮度被大气衰减(透射率为  $T$ ), 使得物体被眼睛感知的视在亮度  $I_{vis}$  小于固有亮度, 同时沿着视线的反方向被大气介质散射到视场内的杂散光也构成了物体视在亮度  $I_{vis}$  的一部分。

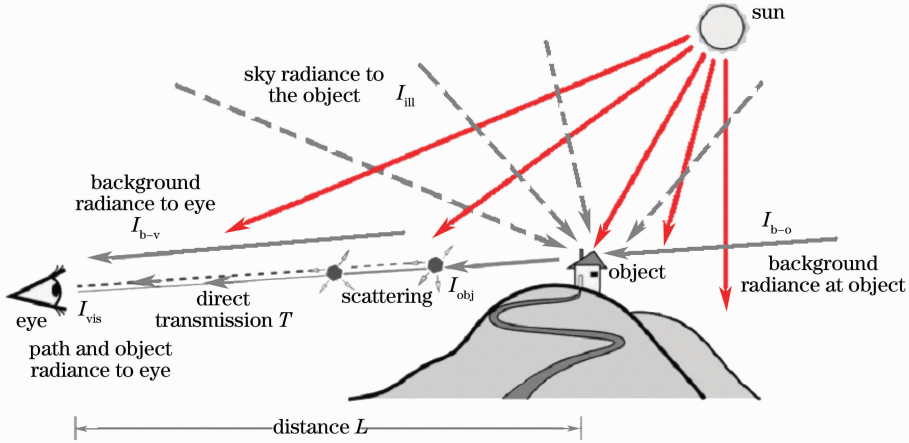


图 1 大气中物体被照明和视觉感知示意图

Fig. 1 Schematic of object illuminated and vision through atmosphere

物体被视觉感知的清晰程度可由一个对比度参数定量描述, 它被定义为物体的亮度与背景亮度的差值与背景亮度的相对大小, 因此物体本身的固有对比度和一定距离  $L$  之外观察的视在对比度分别为

$$C_0 = (I_{obj} - I_{b-o}) / I_{b-o}, \quad (1)$$

$$C_L = (I_{vis} - I_{b-v}) / I_{b-v}, \quad (2)$$

式中  $I_{b-o}$ ,  $I_{b-v}$  分别为物体位置和观测位置处反视线方向的背景亮度。一定距离  $L$  之外观察的视在亮度可以表示为物体本身的固有亮度的衰减分量和视线光路上散射光分量  $I_{path}$  之和:

$$I_{vis} = I_{obj} T + I_{path}, \quad (3)$$

前面已经对大气透射率问题进行过详细的分

析, 这里关键的是求取视线光路上散射光分量。如图 2 所示, 设光路上位置  $z$  处(原点在观察者的位置)一个空气团的体积为  $dV = z^2 dz d\Omega$ , 其散射系数为  $\beta_{sca}(z)$ , 则该气团的散射能量密度正比于  $\beta_{sca} dV$  和入射到该气团上的光照度。由于有视线方向和散射方向非均匀性的问题, 各个方向上的光照度所起的作用不一定相同, 因此气团的散射能量密度和入射到该气团上的光照度不会是简单的函数关系, 把这个复杂关系简记为  $A(z)$ 。这样, 该气团散射到观察者眼睛中的光谱辐射亮度为

$$dI_{path} = A(z) \beta_{sca}(z) dV \cdot T(z) / z^2 / d\Omega = A(z) \beta_{sca}(z) T(z) dz, \quad (4)$$

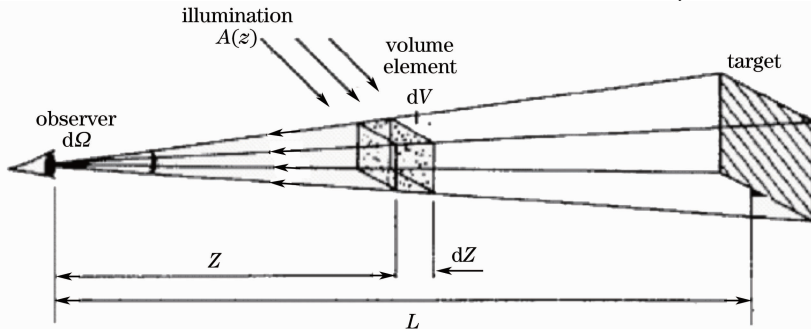


图 2 视线光路上大气路径散射光计算示意图

Fig. 2 Schematic of light scattering in the path of sight

则整个视线光路上的散射光到达观察者眼睛的总光谱辐射亮度为

$$I_{\text{path}} = \int_0^L A(z) \beta_{\text{sca}}(z) \exp\left[-\int_0^z \beta_{\text{ext}}(z') dz'\right] dz, \quad (5)$$

从(5)式可知,对于非均匀视线路径(无论是照度和光学性质)求解(5)式是困难的。

对于照度和光学性质都相同的视线路径,则(5)式可简化为

$$I_{\text{path}} = A(\beta_{\text{sca}}/\beta_{\text{ext}}) [1 - \exp(-\beta_{\text{ext}}L)] = I_{\infty} [1 - \exp(-\beta_{\text{ext}}L)], \quad (6)$$

式中  $I_{\infty}$  为物体在无穷远处视线路径上散射光到达观察者眼睛的总光谱辐射亮度。从(6)式可以直接导出

$$I_{\text{b-v}} = I_{\text{o-v}} = I_{\infty}, \quad (7)$$

由(2),(3)和(7)式可求得

$$C_L = (I_{\text{obj}} - I_{\infty}) \exp(-\beta_{\text{ext}}L) / I_{\infty} = C_0 \exp(-\beta_{\text{ext}}L) = C_0 T. \quad (8)$$

由此可见,对于照度和光学性质都相同的视线路径,物体的视在对比度在大气中的变化规律和能量的变化相同,都正比于大气的透射率。此规律在1924年由 Koschmieder 发现<sup>[7]</sup>,通常称为 Koschmieder 定律。在地面水平观测的情况下,一般将视线路径视为照度和光学性质均匀,此时  $I_{\infty}$  为地平方向天空的总光谱辐射亮度。

只要目标物的视角、物体与背景亮度的对比度  $C$  的绝对值越足够大,人们就可以从背景中识别出物体来。当对比度  $C$  逐渐减小,物体会逐渐变得模糊。当  $C$  小于某一临界值时,即使物体有足够大的视角,也不能把物体从背景中区分出来。这一临界亮度对比度称为对比阈值(contrast threshold),一般用  $\epsilon$  表示。

对比阈值是一个复杂的物理量,既取决于人眼的生理特性,也和外界条件有关,包括物体的视角、视野亮度和物体在视场中的位置。在观察者眼睛已经适应的照度下,随着物体视角和视野亮度的减小,对比阈值增大。物体在视场中央时对比感阈最小,偏离中央时增大。

### 3 气象视距和大气能见度

对比阈值确定的距离就是大气中物体能被感知的最远距离,通称为能见距离。从(8)式可知,对于消光系数均匀的路径,能见距离与物体背景对比度和消光系数的关系为

$$L = -\ln |C_L/C_0| / \beta_{\text{ext}}. \quad (9)$$

由于白背景上的理想暗物体的对比度为  $C_0 = -1$ ,则对应于阈值对比度的  $|C_L| = \epsilon$  的大气能见度  $V$  为

$$V_{\epsilon} = -\ln \epsilon / \beta_{\text{ext}}, \quad (10)$$

亦即大气能见度对应的大气透射率  $T = \epsilon$ ,光学厚度  $\tau = -\ln \epsilon$ 。

需要指出的是,视觉是依靠整个可见光谱区的亮度,而上述推导过程中的辐射亮度以及大气透射率和消光系数都是针对单色辐射的。从前面的知识知道,在可见光谱区,大气消光系数以及天空亮度的光谱分布特性有很明显的差别,因此上述定义中的消光系数应该也必须是单色的,一般选择可见光的中心波长  $0.55 \mu\text{m}$ 。

自1924年 Koschmieder 提出以天空为背景的黑体、白体、灰体目标物的水平能见距理论,建议使用0.02的对比阈值,这个数据一直沿用至今,并得到学术界的广泛使用。标准大气能见度(Standard visibility)定义为对比阈值取0.02时识别白背景上的理想暗物体的距离

$$V_2 = -\ln 0.02 / \beta_{\text{ext}} = 3.912 / \beta_{\text{ext}}. \quad (11)$$

在气象观测和航空等实际应用中,发现对比阈值取0.02的要求是很高的,为此,世界气象组织明确将对比阈值为0.05对应的可视距离定义为气象视距(Meteorological optical range)<sup>[8]</sup>

$$R_M = V_5 = -\ln 0.05 / \beta_{\text{ext}} = 3.0 / \beta_{\text{ext}}. \quad (12)$$

虽然上述两种定义的极限视距有确定的比例关系,但还是有相当可观的差别,在应用外部提供的能见度数据分析大气的消光特性时,一定要搞清楚该数据测量的具体定义。在 Modtran 应用软件的使用说明中,甚至将此两种定义完全颠倒。所以对此量的使用要特别小心。近年来使用各种光学设备测量的能见度数据,只要搞清楚它和消光系数的关系即可,但对早年人工目视方法获取的能见度数据必须慎重对待。

实际天气条件下的大气能见度随时随地变化很大,在福建东山岛地区的能见度冬夏两季的平均日变化特征如图3(a)所示,其它地区可能会出现完全不同的特征,如图3(b)所示<sup>[9]</sup>。在意大利米兰和毛里塔尼亚 Nouakchott 两地能见度的日平均值相同,但日变化趋势截然相反,米兰白天能见度好,午后达最大值,夜间极差;而 Nouakchott 白天的能见度普遍低于夜间。

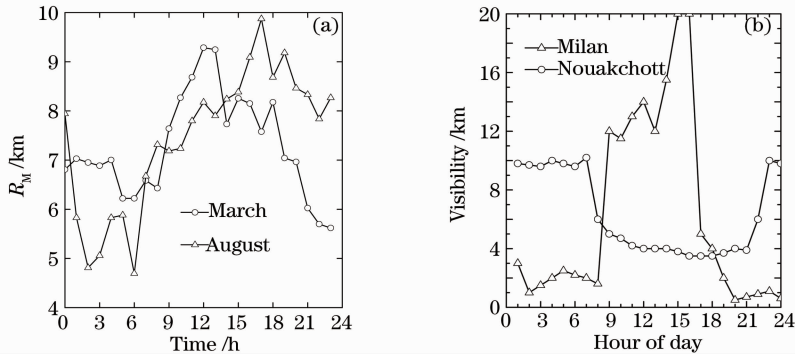


图 3 (a) 福建东山岛近海面夏季和冬季的能见度, (b) 意大利米兰和毛里塔尼亚 Nouakchott 两地能见度的平均日变化特征  
 Fig. 3 (a) diurnal variation of visibility in both summer and near sea surface winter in Dongshan Island, Fujian, (b) annually-averaged diurnal variation of visibility in Milan, Italy and Nouakchott, Mauritania

### 4 非均匀大气中的能见度问题

虽然在气象等应用中最普遍的能见度问题局限在近地面水平方向, 在假定路径均匀的条件下获得了上面的结果。实际上, 水平路径也往往是不均匀的(无论是光学性质或亮度), 面向不同的方向测得的能见度可能就不一样<sup>[10]</sup>。在航空等应用中, 对于飞行器的起降等问题, 往往更关注倾斜路径的能见度。毫无疑问, 斜程能见度也一样取决于对比阈值。在一般大气条件下, 倾斜路径总是非均匀的。

要求非均匀视线路径上物体的视在对比度, 从(5)式可知, 必须知道照度和消光系数的路径分布。虽然已经获得了形式解<sup>[1~3]</sup>, 但由于一般大气探测中可以获得消光系数的路径分布, 但大气亮度的路径分布实际上从未有人观测过。因此那些形式解以后基本上也未得到实际应用。

相当长时间以来, 特别是自激光雷达用于探测大气消光系数的分布以后, 所谓的斜程大气能见度测量问题不时出现<sup>[11]</sup>。其测量或计算原理就是忽视视线路径中大气亮度的影响, 并简单照搬均匀路径的结果, 即将(8)式简单推广到非均匀路径

$$C_L = C_0 T = C_0 \exp\left(-\int_0^L \beta_{\text{ext}} dz\right), \quad (13)$$

对应的所谓斜程能见度由(14)式求出,

$$\int_0^{V_\epsilon} \beta_{\text{ext}}(z) dz = -\ln \epsilon \quad (14)$$

而实际做法往往更简单, 仿照(10)式, 有

$$V_\epsilon = -\ln \epsilon / \bar{\beta}_{\text{ext}}, \quad (15)$$

式中  $\bar{\beta}_{\text{ext}}$  是消光系数简单的平均值。

另一种类似的做法是, 不管水平或倾斜路径, 只按照大气透射率  $T = \epsilon$  来定义, 并且把斜程大气透

射率  $T = \epsilon$  对应的倾斜路径在水平方向的投影距离定义为斜程大气能见度<sup>[12]</sup>。

实际上即使假定非均匀视线路径中大气亮度是均匀的, 对于消光系数非均匀分布的情况, 也不能得到(13)式的结果。而忽略视线路径中大气亮度影响的结果实际上造成所求得的所谓能见度和对比阈值没有什么确定的关系。因此, 如果想使用上述方式求得的所谓斜程能见度表征路径上消光系数的平均分布情况也未尝不可, 但要说它能反映真实的斜程可视距离则是很不准确的。在阅读此类文献时一定要注意不要被误导。

因此, 要获得非均匀路径上的真实的能见度, 必须把光路上的亮度和消光系数都要知道。实际上从第 3 节有关大气辐射传输方程的求解过程可以获得斜程视线路径上物体和背景亮度对比度的简明结果。平行平面大气中倾斜视线能见度问题的几何如图 4 所示, 太阳的天顶角余弦为  $-\mu_0$ , 方位角为  $\phi_0$ 。

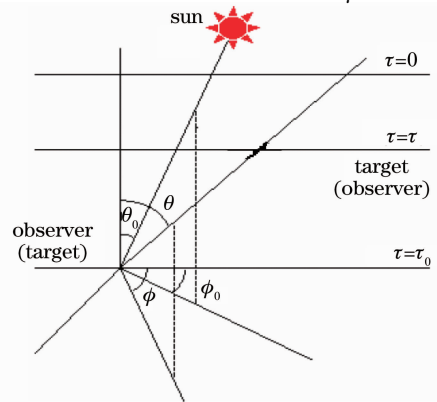


图 4 平行平面大气中倾斜视线能见度问题的几何示意图

Fig. 4 Geometry of slant path visibility problem in parallel plane atmosphere

大气层顶的光学厚度为 0, 大气层底部(地面)的光学厚度为  $\tau_0$ 。当从地面向上观察时, 物体位于光学厚度为  $\tau$  的位置, 观察者视线方向的天顶角余弦为  $\mu$ , 方位角为  $\phi$ , 而光线的天顶角余弦为  $-\mu$ , 方位角为  $\pi + \phi$ 。反之, 观察者自光学厚度为  $\tau$  的位置向下观察位于地面的物体时观察者视线方向的天顶角余弦为  $-\mu$ , 方位角为  $\pi + \phi$ ; 而光线的天顶角余弦为  $\mu$ , 方位

角为  $\phi$ 。

当从地面向上观察位于光学厚度  $\tau$  处的物体, 物体和大气背景亮度分别向下斜程传输到观察者, 从辐射传输方程的形式解可知, 物体本身亮度到达观察者的视在亮度以及观察者位置处的大气背景亮度(略去下标)分别为

$$I_{\text{vis}}(\tau_0, -\mu, \phi) = I_{\text{obj}}(\tau; -\mu, \phi) \exp[-(\tau_0 - \tau)/\mu] + \int_{\tau}^{\tau_0} J(\tau', -\mu, \phi) \exp[-(\tau_0 - \tau')/\mu] d\tau'/\mu, \quad (16)$$

$$I(\tau_0, -\mu, \phi) = I(\tau; -\mu, \phi) \exp[-(\tau_0 - \tau)/\mu] + \int_{\tau}^{\tau_0} J(\tau', -\mu, \phi) \exp[-(\tau_0 - \tau')/\mu] d\tau'/\mu, \quad (17)$$

于是物体背景的视在对比度为

$$C_L = [I_{\text{obj}}(\tau; -\mu, \phi) - I(\tau; -\mu, \phi)] \exp[-(\tau_0 - \tau)/\mu] / I(\tau_0; -\mu, \phi) = C_0 T \cdot I(\tau; -\mu, \phi) / I(\tau_0; -\mu, \phi), \quad (18)$$

将(18)式与(8)式相比可以看出, 斜程大气中的物体背景视在对比度的变化规律除了依然遵守线性衰减特性(正比于透射率)以外, 还与物体位置处以及观察者位置处的大气背景亮度之比成正比。由于这两个位置处的大气背景亮度和整层大气的光学特性以及地表反射特性都有关系, 显然斜程大气能见度问题要比水平能见度问题复杂得多。

同样地, 当从光学厚度  $\tau$  处向下观察位于地面的物体, 物体和大气背景亮度分别向上斜程传输到观察者, 从辐射传输方程的形式解为可知, 物体本身亮度到达观察者的视在亮度以及观察者位置处的大气背景亮度分别为

$$I_{\text{vis}}(\tau, +\mu, \phi) = I_{\text{obj}}(\tau_0; +\mu, \phi) \exp[-(\tau_0 - \tau)/\mu] + \int_{\tau}^{\tau_0} J(\tau', +\mu, \phi) \exp[-(\tau_0 - \tau')/\mu] d\tau'/\mu, \quad (19)$$

$$I(\tau, +\mu, \phi) = I(\tau_0; +\mu, \phi) \exp[-(\tau_0 - \tau)/\mu] + \int_{\tau}^{\tau_0} J(\tau', +\mu, \phi) \exp[-(\tau_0 - \tau')/\mu] d\tau'/\mu, \quad (20)$$

于是物体背景的视在对比度为

$$C_L = [I_{\text{obj}}(\tau_0; +\mu, \phi) - I(\tau_0; +\mu, \phi)] \exp[-(\tau_0 - \tau)/\mu] / I(\tau; +\mu, \phi) = C_0 T \cdot I(\tau_0; +\mu, \phi) / I(\tau; +\mu, \phi). \quad (21)$$

(21)式与(18)式表现的规律完全一致。

以标准大气模式简单分析一下斜程能见度的情况。选择美国标准大气、水平能见度( $V_2$ )为 5 km 的乡村气溶胶模式和耕地型地表, 当太阳天顶角为  $30^\circ$ , 视线方位角为  $180^\circ$ (相对于太阳)、视线路径 10 km, 分别自地面进行斜向上和自 2 km 高度斜向下观察时, 地面和 2 km 高度的大气背景亮度分别如图 5 和 6 所示。

在此二种情况下, 由于视线路径长度相等, 大气透射率也相同。斜向上观察时, 观察者(地面)的大气背辐射景亮度显著大于物体(2 km 高度)的大气背景亮度, 使得理想黑物体与背景的视在对比度的视在对比

度显著小于透射率值。斜向下观察时, 观察者(2 km 高度)的大气背景辐射亮度略小于物体(地面)的大气背景亮度, 使得理想黑物体与背景的视在对比度的视在对比度略大于透射率值。这二种情况下按照(21)式与(18)式计算的理想黑物体的视在对比度的光谱分布特性如图 7 所示。向上观察时的  $0.55 \mu\text{m}$  处的对比度远小于 0.02, 向下时接近 0.02。可以看出两个显著的特征: 1) 向下观察时的对比度要显著大于向上观察时的对比度; 2) 随波长的增大, 对比度近幂律增大。第一个特征在于无论向上还是向下观察, 地面附近的大气背景亮度要高于高空的大气背景亮度, 因而向下观察时背景的亮度降低了。第二个特征可

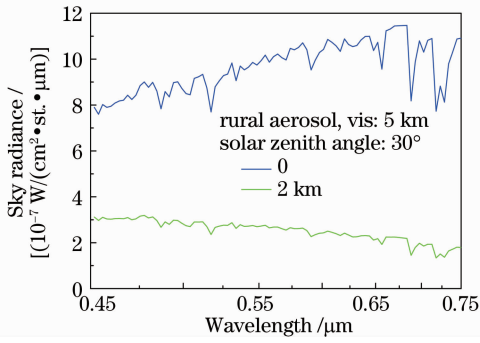


图 5 斜向上观察时地面和 2 km 高度的大气背景辐射亮度(水平能见度 5 km)

Fig. 5 Sky radiance observed from ground and on a height of 2 km above ground when looking upward (horizontal visibility is 5 km)

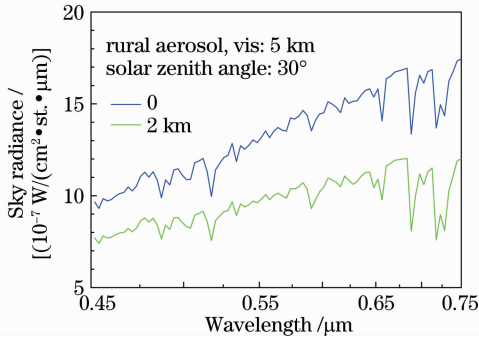


图 6 斜向下观察时地面和 2 km 高度的大气背景辐射亮度(水平能见度 5 km)

Fig. 6 Sky radiance observed from ground and on a height of 2 km above ground when looking downward (horizontal visibility is 5 km)

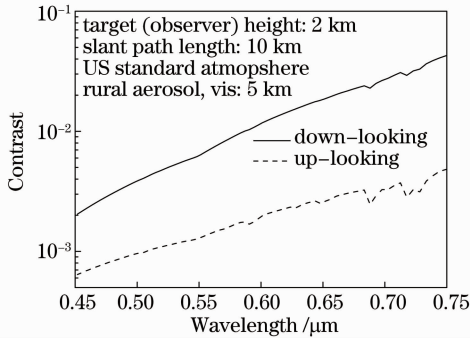


图 7 理想黑物体斜向上和斜向下观察时的视在对比度(水平能见度 5 km)

Fig. 7 Visual contrast of an ideal black object for both up-looking and down-looking (horizontal visibility is 5 km)

能在于这里考虑的是气溶胶粒子浓度较大的情况,长波端的大气透射率明显大于短波端。

再看一下水平能见度( $V_2$ )为 23 km 的乡村气溶胶模式下的情况(其它条件都和水平能见度 5 km

的情况相同),视线路径 30 km,分别自地面进行斜向上和自 2 km 高度斜向下观察时,地面和 2 km 高度的大气背景亮度分别如图 8 和 9 所示。理想黑物体的视在对比度的光谱分布特性如图 10 所示。可

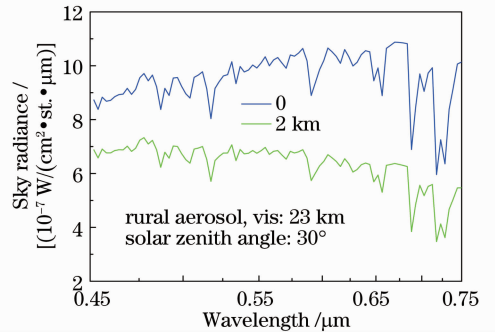


图 8 斜向上观察时地面和 2 km 高度的大气背景辐射亮度(水平能见度 23 km)

Fig. 8 Sky radiance observed from ground and on a height of 2 km above ground when looking upward (horizontal visibility is 23 km)

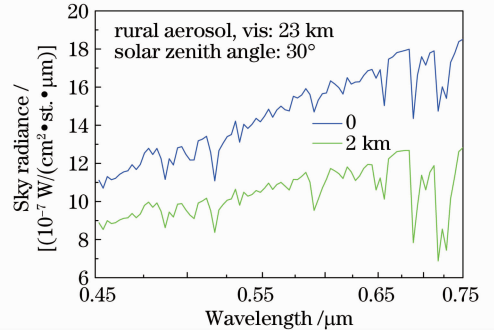


图 9 斜向下观察时地面和 2 km 高度的大气背景亮度(水平能见度 23 km)

Fig. 9 Sky radiance observed from ground and on a height of 2 km above ground when looking downward (horizontal visibility is 23 km)

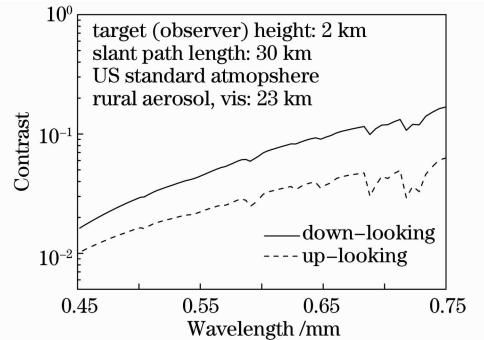


图 10 理想黑物体斜向上和斜向下观察时的视在对比度(水平能见度 23 km)

Fig. 10 Visual contrast of an ideal black object for both up-looking and down-looking (horizontal visibility is 23 km)

以看出,虽然与水平能见度 5 km 的情况有一定的差别,但基本特征相似。

## 5 结 论

本文以物体背景对比度为研究对象,详细探讨了大气中的视觉问题,澄清了水平能见度的概念,从辐射传输方程出发研究了斜程大气能见度问题,给出了典型大气条件下斜程大气能见度的基本特征,特别比较了向上观察和向下观察时能见度的区别。

实际应用中,在可见光光谱范围内,被观测的物体一般都不是理想黑体,其亮度和背景都来自太阳光及其在大气中的散射光。物体的亮度和物体本身的光学性质、几何形状、粗糙度及其与太阳照射方向的几何方位有关。作为一般情况的分析,可以作三个假定:物体为灰体,即其光谱反射率与波长无关;物体的照明光来自天空漫射光,太阳光的直射光不构成贡献;成像物体为漫反射体。这样就可以求得物体位置处的对比度,然后再按照上面的分析方法求得各种视线路径上的视在对比度。

## 参 考 文 献

- 1 S. Q. Duntley. The reduction of apparent contrast by the atmosphere [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1948, **38**(2): 179~187
- 2 S. Q. Duntley. The visibility of distant objects [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1948, **38**(3): 237~249
- 3 W. E. K. Middleton. *Vision Through the Atmosphere* [M]. Toronto; U. Toronto Press, 1952
- 4 S. Q. Duntley, J. L. Gordon, J. H. Taylor *et al.*. Visibility [J]. *Appl. Opt.*, 1964, **3**(5): 549~598
- 5 H. Horvath. Atmospheric visibility [J]. *Atmospheric Environment*, 1981, **15**: 1785~1796
- 6 Y. Wang, R. Rao. Slant visibility: multi-factor analysis [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(10): 945~950  
王毅, 饶瑞中. 空间斜程能见度的影响因素分析[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(10): 945~950
- 7 H. Koschmieder. Theorie der horizontalen sichtweite [J]. *Beitr. Phys. Frei. Atmos.*, 1924, **12**: 171~181
- 8 WMO. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* (Sixth edition) [S]. Geneva: WMO, 1996
- 9 R. B. Husar, J. D. Husar, L. Martin. Distribution of continental surface aerosol extinction based on visual range data [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(29-30): 5067~5078
- 10 J. P. Pichamuthu. Directional variation of visual range due to anisotropic atmospheric brightness [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(8): 1464~1468
- 11 J. L. Gaumet, A. Petitpa. Lidar-tansmissionmeter visibility comparisons over slant and horizontal paths [J]. *J. Atoms. Sci.*, 1982, **21**(5): 683~694
- 12 G. H. Ruppertsberg, R. Schellhase. Slant meteorological visibility [J]. *J. Modern Opt.*, 1979, **26**(5): 699~709