

红外大气能见度: 定义、算法及关键因素分析

张景伟^{1,2} 武鹏飞² 饶瑞中²

¹合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

²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 通常用大气能见度表征大气对可见光波段的视觉影响程度,但它并不适用于红外波段。鉴于大气能见度的直观特性和红外光电技术的迫切需求,参照可见光大气能见度的定义,依据红外系统对比度阈值,提出了红外大气能见度的概念。根据这里提出的定义和涉及的红外大气透射率的物理过程,分析了决定红外大气能见度的关键大气因素。一般情况下,这些因素是可见光大气能见度、水汽含量、气溶胶类型。建立了红外大气能见度与这些关键参数间的定量关系,计算了噪声等效温差(NETD)为0.05 K对应的3个大气窗口(1.06、3~5、8~12 μm)的红外大气能见度。

关键词 大气光学; 大气能见度; 红外系统; 红外辐射传输; 视觉

中图分类号 TN211; TN215

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1101002

Infrared Atmospheric Visibility : Definition , Algorithm and Analysis of Key Factors

Zhang Jingwei^{1,2} Wu Pengfei² Rao Ruizhong²

¹*School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei, Anhui 230009, China*

²*Key Laboratory for Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China*

Abstract Usually, atmospheric visibility is used to describing the atmosphere's visual effects in the visible light, but it does not apply to infrared wavelengths. In view of the visualized characteristics of atmospheric visibility and the pressing needs of the infrared electric technology, based on the infrared system contrast threshold, referring to the definition of visible light atmospheric visibility, the concept of infrared atmospheric visibility is put forward. According to the definition presented here and the physical process of infrared atmospheric transmittance involved in, the key determinants factors of infrared atmospheric visibility are analyzed. Generally, these factors are atmospheric visibility of visible light, absolute humidity and aerosol types. the quantitative relationship between the infrared atmospheric visibility and these factors is established, and the infrared atmospheric visibility of atmospheric windows (1.06,3~5,8~12 μm) is calculated, whose noise equivalent temperature difference (NETD) is 0.05 K.

Key words atmospheric optics; atmospheric visibility; infrared system; infrared radiative transfer; vision

OCIS codes 010.1290; 010.1230; 010.1320; 010.5620

1 引言

随着红外技术的不断发展和其在军用、民用领域的广泛应用,红外辐射在大气中的传输研究越来越受到重视,红外辐射大气透射率对红外光电系统(如跟踪系统、搜索系统、警戒系统和热成像系统等)的设计、性

收稿日期: 2015-05-04; 收到修改稿日期: 2015-07-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41475024)

作者简介: 张景伟(1989—),男,硕士研究生,主要从事红外大气能见度方面的研究。E-mail: zhangwei_3377@126.com

导师简介: 饶瑞中(1963—),男,博士,研究员,主要从事大气湍流、激光大气传输、光辐射与图像的大气传播等方面的研究。

E-mail: rao@aiofm.ac.cn

能评估等具有重要影响。大气成分的复杂性及大气状态随气象条件变化的复杂性,导致红外辐射的大气衰减特性的复杂性,在一些恶劣天气条件下,大气甚至成为制约相关应用的最主要因素。因此,研究大气对红外系统作用距离的影响,对相关红外工程应用具有非常重要的实际意义。

传统表征红外系统探测能力的指标为红外系统作用距离^[1],该指标主要由目标与大气透射率、光学系统、探测器和信号处理4部分的性能决定。它从整体上反映了红外系统作用距离与系统各组成部分之间的相互关系,而对于工程应用者来说,光学系统、探测器与信号处理这3部分都是固定量,在不同的应用场合红外系统中唯一变化的量是大气透射率。目前针对红外波段大气能见度的定义、算法及影响因素的分析研究尚未见报道,迫于相关红外光电工程应用的强烈需求,本文开创性地提出了红外大气能见度的定义,用于表征大气对红外系统作用距离的影响。本文简要介绍了描述人眼视觉感知的0.55 μm波长可见光大气能见度,借鉴可见光大气能见度的定义,提出了红外大气能见度的概念,分析了决定该参量的关键大气因素,并根据大气辐射传输的物理过程建立了红外大气能见度与这些因素间的定量关系。

2 可见光大气能见度

物体被视觉感知的清晰程度可由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。目标/背景对比度阈值确定的距离就是大气中物体能被感知的最远距离,通常称为能见度^[2-4]。对于消光系数均匀的路径,可见距离与物体背景对比度和消光系数 β_{ext} 的关系为

$$L = -\ln|C_L/C_0|/\beta_{\text{ext}}, \quad (1)$$

式中 C_0 为物体本身的固有对比度, C_L 为一定距离 L 之外观察的视在对比度。

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

$$V_\varepsilon = -\ln \varepsilon / \beta_{\text{ext}}, \quad (2)$$

式中 ε 为对比度阈值。

1924年,Koschmieder^[5]提出以天空为背景的黑体、白体、灰体目标物的水平能见度理论,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。标准大气能见度定义为对比度阈值取0.02时识别白背景上的理想暗物体的距离:

$$V = -\ln 0.02 / \beta_{\text{ext}} = 3.912 / \beta_{\text{ext}}. \quad (3)$$

在气象观测和航空等实际应用中,发现对比度阈值取0.02的要求是很高的,为此,世界气象组织在《气象仪器和观测方法指南》中明确将对比度阈值为0.05对应的可视距离定义为气象视距:

$$V_{\text{is}} = -\ln 0.05 / \beta_{\text{ext}} = 3.0 / \beta_{\text{ext}}. \quad (4)$$

上述标准大气能见度和气象视距均对应0.55 μm波长,本文以下所用可见光大气能见度均指0.55 μm波长上的气象视距。

3 红外大气能见度定义及定量计算模型

3.1 定义

在大气中,红外系统能否探测到目标取决于多种因素,包括红外系统探测器的热灵敏度;目标的几何和物理特性,如大小、形状、亮温等;背景的红外光谱特性;大气的红外光谱透射率特性等。在一定的探测距离上,目标与背景的辐亮度对比度是探测目标依据的主要物理因素。在探测较远物体时,具有决定作用的是辐亮度差异。

参考可见光大气能见度的理论定义,本文首先给出红外大气能见度的定义:具有一定噪声温差(NTD)的红外系统能够探测到白(热)背景上的暗(冷)目标的最远距离。

依据黑体辐射理论^[6]及大气对红外辐射传输影响的相关研究成果,本文根据上述定义建立了红外大气能见度的定量模型。为此,使用以下假设:

1) 在近地面水平方向,观测路径上的大气是均匀的,即视线路径上辐照度和光学性质都相同,散射和消光系数是与路径无关的常数;

2) 目标表面看作漫射灰体,目标表面的红外辐射亮度与观测方向无关^[7-8];

3) 视线路径上任一空气团微元的散射辐射、热辐射假设为点源辐射,辐射强度与气团体积成正比。

目标探测的清晰程度可由一个对比度参数定量描述,其定义为目标辐亮度与背景辐亮度的差值与背景辐亮度的相对大小,因此目标-背景固有对比度 C_0 和一定距离之外红外探测器处的视在对比度 C_L 分别为

$$C_0 = (I_{\text{obj}} - I_{\text{b-o}}) / I_{\text{b-o}}, \quad (5)$$

$$C_L = (I_{\text{obj-i}} - I_{\text{b-i}}) / I_{\text{b-i}}, \quad (6)$$

式中 I_{obj} 和 $I_{\text{obj-i}}$ 分别为目标本身固有辐亮度和目标辐亮度被大气衰减后探测器接收到的视在辐亮度, $I_{\text{b-o}}$ 和 $I_{\text{b-i}}$ 分别为目标物位置和探测器位置处反视线方向的大气背景辐亮度。目标视在辐亮度 $I_{\text{obj-i}}$ 可表示为目标固有辐亮度经过大气后的透过分量、视线光路上散射辐射分量 I_{sca} 和热辐射分量 I_{tr} 之和(t 为大气透射率):

$$I_{\text{obj-i}} = I_{\text{obj}}t + I_{\text{sca}} + I_{\text{tr}}. \quad (7)$$

由上述分析可见,获取目标-背景视在对比度首先要求取视线光路上的散射辐射分量 I_{sca} 和热辐射分量 I_{tr} 。

视线路径上大气辐射如图1所示,设光路上位置 z 处(原点在探测器位置)立体角为 Ω 的一个空气微元的体积为 $dV = z^2 dz d\Omega$,其散射系数为 $\beta_{\text{sca}}(z)$ 。将该气团微元看作一个点光源,则其在观测视线反方向上的散射光强度正比于 $\beta_{\text{sca}} dV$ 和入射到该气团上的环境光辐照度(包括太阳直射光、天空漫射光和地表反射光):

$$dI(z) = A(z)\beta_{\text{sca}}(z)dV, \quad (8)$$

式中 $A(z)$ 表示气团微元的散射光强度与入射到该气团上的辐照度的函数关系。根据点源辐射的距离平方反比定律,可得到该气团微元散射到探测器的辐亮度为

$$dI_{\text{sca}} = A(z)\beta_{\text{sca}}(z)dV \cdot t(z) / z^2 / d\Omega = A(z)\beta_{\text{sca}}(z)t(z) dz. \quad (9)$$

则 (λ_1, λ_2) 波段范围内整个视线光路散射辐射到达探测器的总辐亮度为

$$I_{\text{sca}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^L A(z, \lambda) \beta_{\text{sca}}(z, \lambda) t(z, \lambda) dz d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^L A(z, \lambda) \beta_{\text{sca}}(z, \lambda) \exp\left[-\int_0^z \beta_{\text{ext}}(z', \lambda) dz'\right] dz d\lambda. \quad (10)$$

对于环境光辐照度和光学性质均匀的观测视线路径,则有 $A(z, \lambda) = A(\lambda)$, $\exp\left[-\int_0^z \beta_{\text{ext}}(z', \lambda) dz'\right] = \exp[-\beta_{\text{ext}}(\lambda)z]$, (10)

式简化为

$$I_{\text{path}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A(z)(\beta_{\text{sca}}/\beta_{\text{ext}})\{1 - \exp[-\beta_{\text{ext}}(\lambda)L]\} d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\text{sca}, \infty} \{1 - \exp[-\beta_{\text{ext}}(\lambda)L]\} d\lambda, \quad (11)$$

式中 $I_{\text{sca}, \infty}$ 表示物体在无穷远处时视线路径上散射光到达探测器的总辐射亮度。

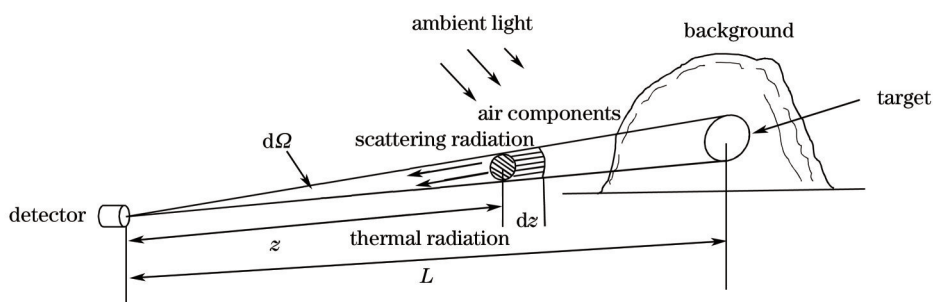


图1 视线路径上大气辐射计算示意图

Fig.1 Schematic of atmospheric radiation in the path of sight

观测视线路径上空气团微元本身热辐射到达探测器的辐亮度为

$$dI_{\text{tr}} = f(T, z) dV \cdot t(z, \lambda) / z^2 / d\Omega = f(T, z) t(z, \lambda) dz, \quad (12)$$

式中 T 表示温度, $f(T, z)$ 是与气团微元温度有关的函数。则 (λ_1, λ_2) 波段范围内整个视线光路上热辐射到达探测器的总辐亮度为

$$I_{\text{tr}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^L f(T, z) t(z, \lambda) dz d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^L f(T, z) \exp\left[-\int_0^z \beta_{\text{ext}}(z', \lambda) dz'\right] dz d\lambda. \quad (13)$$

同样对于环境光辐照度和光学性质均匀的视线路径,(13)式可简化为

$$I_{tr} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{tr,\infty} \{1 - \exp[-\beta_{ext}(\lambda)L]\} d\lambda, \quad (14)$$

式中 $I_{tr,\infty}$ 为无穷远处大气背景热辐射到达探测器的总辐亮度。由此得到 $I_{b-i} = I_{b-o} = I_{scat,\infty} + I_{tr,\infty} = I_{\infty}$, 在近地面水平方向上,一般将视线路径视为环境光辐照度和光学性质均匀,此时 I_{∞} 为地平方向天空背景的总辐亮度。

在假设 1)、2)成立的条件下,将无穷远处大气背景近似为温度为 T_1 的无限大面源黑体(可由大气热辐射和散射辐射计算等效黑体温度),其辐亮度由普朗克函数 $B_{\lambda}(T_1)$ 计算, $B_{\lambda}(T_1) = c_1 / \left\{ \lambda^5 \cdot [\exp(c_2 / \lambda T_1) - 1] \right\}$, 其中第一辐射常数 $c_1 = 2\pi c^2 h = 3.7427 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}$, 第二辐射常数 $c_2 = \frac{ch}{k} = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, 这里 c 为光速, h 为普朗克常数, k 为玻尔兹曼常数^[9]。大气背景辐射在 (λ_1, λ_2) 范围内的总辐亮度为

$$I_{\infty} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\lambda}(T_1) d\lambda. \quad (15)$$

将目标看作温度为 T_2 、单色辐射率为 ε_{λ} 的漫射灰体,其在 (λ_1, λ_2) 范围内的总辐亮度为

$$I_{obj} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T_2) d\lambda. \quad (16)$$

由(5)~(7)、(11)、(14)式可得(为简化计算取 $\varepsilon_{\lambda} = 1$)

$$C_0 = (I_{obj} - I_{\infty}) / I_{\infty}, \quad (17)$$

$$C_L = \frac{I_{obj-i} - I_{b-i}}{I_{b-i}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(T_2) \exp[-\beta(\lambda)L] d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(T_1) \{1 - \exp[-\beta(\lambda)L]\} d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(T_1) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(T_1) d\lambda}, \quad (18)$$

即

$$C_L = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [B(T_2) - B(T_1)] \exp[-\beta_{ext}(\lambda)L] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(T_1) d\lambda}. \quad (19)$$

根据上述红外大气能见度定义,即具有一定噪声温差的红外系统能够探测到理想白(热)背景上的理想暗(冷)物体的最远距离,在将红外系统热灵敏度等效为辐亮度对比度阈值 ε 的情况下,可由 $B(T_2) = 0$ 时的(19)式来计算红外大气能见度 L , 即

$$\varepsilon = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(T_1) \exp[-\beta_{ext}(\lambda)L] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(T_1) d\lambda}. \quad (20)$$

3.2 对比度阈值和系统噪声等效温差

红外系统对比度阈值可由红外系统噪声等效温差(NETD)计算得到。噪声等效温差是衡量红外探测系统温度灵敏度的一个重要客观指标(用 N_{ETD} 表示),目前国内外常用的红外系统探测器的噪声等效温差一般在 0.02 K~0.15 K 范围内。取大气背景等效亮温 $T_1 = 300 \text{ K}$, 探测器噪声等效温差 $N_{ETD} = 0.02 \text{ K}, 0.05 \text{ K}, 0.08 \text{ K}$ 时对应的目标视在亮温为 $T_2 = 300.02 \text{ K}, 300.05 \text{ K}, 300.08 \text{ K}$, 则可计算出对比度阈值为

$$\varepsilon = \frac{I_{obj-i} - I_{b-i}}{I_{b-i}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [B(T_2) - B(T_1)] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(T_1) d\lambda}. \quad (21)$$

根据(21)式可分别计算出 1.06、3~5、8~12 μm 在上述 3 种 N_{ETD} 下的对比度阈值,结果如表 1 所示。

表 1 $N_{ETD} = 0.02 \text{ K}, 0.05 \text{ K}, 0.08 \text{ K}$ 时, 1.06、3~5、8~12 μm 波段对比度阈值 ($T_1 = 300 \text{ K}$)

Table 1 Contrast threshold of 1.06, 3~5, 8~12 μm when $N_{ETD} = 0.02 \text{ K}, 0.05 \text{ K}, 0.08 \text{ K}$ ($T_1 = 300 \text{ K}$)

N_{ETD}	0.02 K	0.05 K	0.08 K
$\varepsilon(1.06 \mu\text{m})$	0.003022	0.007568	0.012135
$\varepsilon(3\sim5 \mu\text{m})$	0.000733	0.00181	0.0029
$\varepsilon(8\sim12 \mu\text{m})$	0.000327	0.000818	0.00131

3.3 大气消光系数

大气介质的消光系数由大气分子和气溶胶粒子的吸收和散射系数决定。大气分子吸收系数复杂的光

谱特性决定了不同波长的红外辐射大气衰减特性存在很大的区别,同时由于大气介质(包括吸收气体分子含量和气溶胶粒子特性)复杂的时空变化特性,同一波段红外辐射的大气衰减特性在不同的时间和地点也会有很大的变化^[2]。

大气气溶胶是大气的重要组成部分,也是大气物理化学过程中的一个重要因素,大气气溶胶散射对红外辐射传输有着重要的衰减作用^[10~12]。而在一般的工程应用中往往没有条件获取大气气溶胶粒子的详细信息,但可以根据应用地区的实际情况大致判断气溶胶粒子的类型,进而可根据云和气溶胶软件包(OPAC)^[13]计算得到相应气溶胶类型的消光系数。OPAC 提供了 10 种气溶胶粒子组分在 8 种相对湿度(RH, H_R)(0%、50%、70%、80%、90%、95%、98%、99%)、61 个波长(0.25~40 μm)条件下,每立方厘米体积内单个粒子的绝对消光系数 β_e^1 数据库。根据该数据库可得到包含不同粒子组分的不同气溶胶类型的绝对消光系数 β_e :

$$\beta_e(\lambda, H_R) = N \sum_i \beta_{e,i}^1 \alpha_i, \quad (22)$$

式中 N 表示总粒子数密度, i 表示不同气溶胶粒子组分, α_i 表示每种组分的数量混合比。

在已知 0.55 μm 波长可见光大气能见度 V_{is} 条件下可由下式得到 0.55 μm 气溶胶消光系数 $\beta_e(0.55 \mu\text{m})$:

$$V_{is} = 3.0 / [\beta_e(0.55 \mu\text{m}) + \beta_m(0.55 \mu\text{m})], \quad (23)$$

式中 $\beta_m(0.55 \mu\text{m})$ 为 0.55 μm 波长上大气分子消光系数,在海平面处标准大气压下 $\beta_m(0.55 \mu\text{m})$ 可近似地取 0.01159。

根据(22)式和(23)式,在相同气溶胶类型(各粒子组分及其数量混合比不变)条件下,可得到不同可见光大气能见度 V_1 、 V_2 条件下不同波长上气溶胶消光系数与 0.55 μm 气溶胶消光系数的关系为

$$\frac{\beta_e^{(V_1)}(\lambda, H_R)}{\beta_e^{(V_1)}(0.55 \mu\text{m}, H_R)} = \frac{N_1 \sum_i \beta_{e,i}^1 \alpha_i}{N_1 \sum_i \beta_{e,i}^1 \alpha_i} = \frac{\beta_e^{(V_2)}(\lambda, H_R)}{\beta_e^{(V_2)}(0.55 \mu\text{m}, H_R)} = \frac{N_2 \sum_i \beta_{e,i}^1 \alpha_i}{N_2 \sum_i \beta_{e,i}^1 \alpha_i}. \quad (24)$$

根据(22)~(24)式可得到任意可见光大气能见度 V 条件下不同波长上的气溶胶消光系数为

$$\beta_e^{(V)}(\lambda, H_R) = \beta_e^{(V_{is})}(\lambda, H_R) \frac{\frac{3.0}{V} - 0.01159}{\frac{3.0}{V_{is}} - 0.01159}, \quad (25)$$

式中 V_{is} 可由 OPAC 根据其内嵌的各气溶胶类型总粒子数密度计算得到。

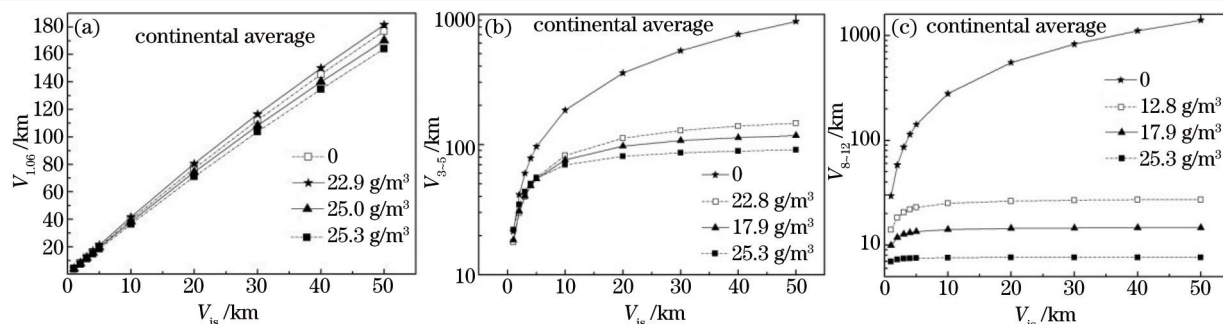
各种大气分子对红外辐射衰减产生影响的主要有水汽、甲烷、二氧化碳、臭氧、一氧化碳、氧化亚氮等,除水汽外,其他气体可看作常量气体,其含量随时间和地点变化不大。采用目前国际上公认的精确计算方法,即逐线积分法 LBL^[14]和 MT_CKD 法分别计算任意水汽含量条件下的大气分子线吸收系数、连续吸收系数和 Rayleigh 散射系数,从而得到分子总消光系数 β_m , 将其与(25)式相加即可得到任意可见光大气能见度和水汽含量条件下的大气消光系数 $\beta = \beta_e + \beta_m$ 。

4 影响红外大气能见度的关键因素分析

在取近地面大气背景辐射亮温 T_1 为 300 K、气压 $P=1 \text{ atm}$ ($1 \text{ atm}=1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$)、 N_{ETD} 为 0.05 K 的条件下,利用(20)式,采用逐次逼近算法(计算精度为 10^{-6})计算 10 种气溶胶类型(清洁陆地型、一般陆地型、污染陆地型、清洁海洋型、污染海洋型、热带海洋型、城市型、沙漠型、北极型、南极型),3 个大气窗口(1.06、3~5、8~12 μm)的红外大气能见度。

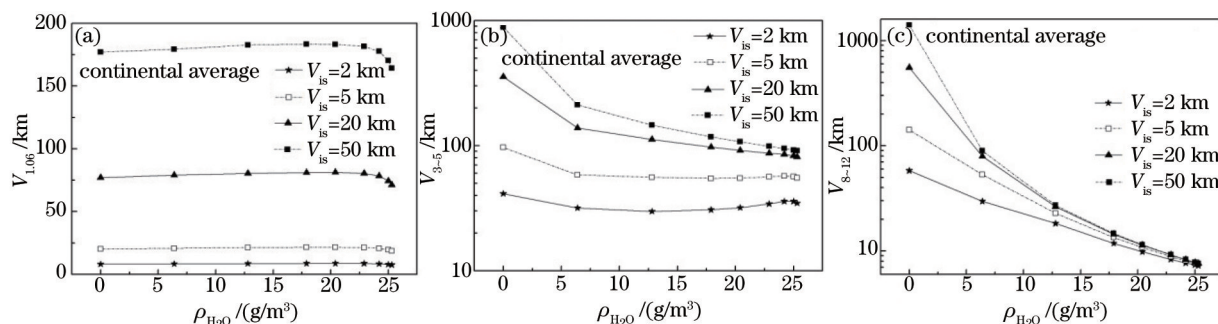
图 2 给出了一般陆地型气溶胶在不同水汽含量条件下 1.06、3~5、8~12 μm 波段红外大气能见度与可见光大气能见度的关系。

从图 2 可以看出,不同水汽含量条件下 3 个大气窗口(1.06、3~5、8~12 μm)的红外大气能见度均随可见光大气能见度的增大而增大,其中 1.06 μm 大气能见度随可见光能见度呈线性增大趋势,前者大致是后者的 4 倍,而 3~5、8~12 μm 波段在不考虑水汽吸收($\rho_{\text{H}_2\text{O}}=0$)的情况下随可见光能见度的增大趋势较快,当考虑水汽吸收时,在低能见度时增大趋势较快,而在高能见度时变化缓慢,尤其是 8~12 μm 在高能见度时基本不变。

图2 不同水汽含量条件下(a) 1.06、(b) 3~5、(c) 8~12 μm 波段大气能见度与可见光大气能见度的关系Fig.2 Dependence of the infrared atmospheric visibility on the visibility of visible light under different water vapor contents at the wavelengths of (a) 1.06, (b) 3~5, (c) 8~12 μm

这主要是因为 1.06 μm 与 0.55 μm 同样主要受气溶胶衰减的影响,但由于前者波长长,影响相对较小,因此两者对应的能见度呈线性递增关系,且 1.06 μm 要比 0.55 μm 大。而 3~5 μm 波段红外辐射受气溶胶消光衰减的影响较小,在高可见光能见度时,气溶胶衰减的影响更小,在 8~12 μm 波段甚至可以忽略。

图 3 给出了一般陆地型气溶胶在不同可见光大气能见度条件下 1.06、3~5、8~12 μm 波段红外大气能见度与水汽含量的关系。

图3 不同可见光大气能见度条件下(a) 1.06、(b) 3~5、(c) 8~12 μm 波段大气能见度与水汽含量的关系Fig.3 Dependence of the infrared atmospheric visibility on the water vapor content under different visibilities of visible light at the wavelengths of (a) 1.06, (b) 3~5, (c) 8~12 μm

从图 3 可以看出,3 个大气窗口(1.06、3~5、8~12 μm)的红外大气能见度均随水汽含量的增大总体上呈减小的趋势,其中 1.06 μm 变化趋势缓慢,而 3~5 μm 和 8~12 μm 中长波红外变化趋势较快。这主要是因为 3~5 μm 和 8~12 μm 波段内存在水汽吸收带,受水汽衰减影响较大,而 1.06 μm 受水汽影响很小。此外,水汽含量的增加也会导致气溶胶尺度谱和复折射率的变化,从而引起气溶胶衰减的变化,这就导致了 1.06 μm 波长、3~5 μm 波段在低能见度条件下存在红外大气能见度随水汽含量的增大而呈非单调减小的复杂情况,如图 3(a)、(b) 所示。同时,由于 8~12 μm 波段受气溶胶影响很小,因此水汽含量造成气溶胶衰减的变化对 8~12 μm 大气能见度并不会产生明显影响。

计算了水汽含量 $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 12.8 g/m^3 (在 300 K、1atm 下对应的相对湿度为 50%) 条件下 10 种气溶胶类型 1.06、3~5、8~12 μm 波段红外大气能见度与可见光大气能见度的关系。由于陆地型 4 种气溶胶,海洋型 3 种气溶胶的变化曲线比较接近,为了从图中更清晰直观地反映计算结果,图 4 给出了一般陆地型、清洁海洋型、沙漠型和南极型 4 种气溶胶类型下红外大气能见度与可见光大气能见度的关系。

同时图 5 给出可见光大气能见度 V_{is} 为 5 km 条件下 4 种气溶胶类型 1.06、3~5、8~12 μm 波段红外大气能见度与水汽含量的关系。

由图 4 及图 5 可知,不同气溶胶类型的红外大气能见度随可见光大气能见度、水汽含量有相同的变化趋势,均随可见光大气能见度的增大而增大,随水汽含量的增大总体上呈现减小的趋势,但不同的气溶胶类型又有不同的变化曲线,这是因为不同的气溶胶类型包含不同的气溶胶粒子组分,而每种粒子组分的尺度谱和复折射率受水汽影响的程度不同,从而导致气溶胶衰减的不同。其中清洁陆地型、一般陆地型、污染陆地型、

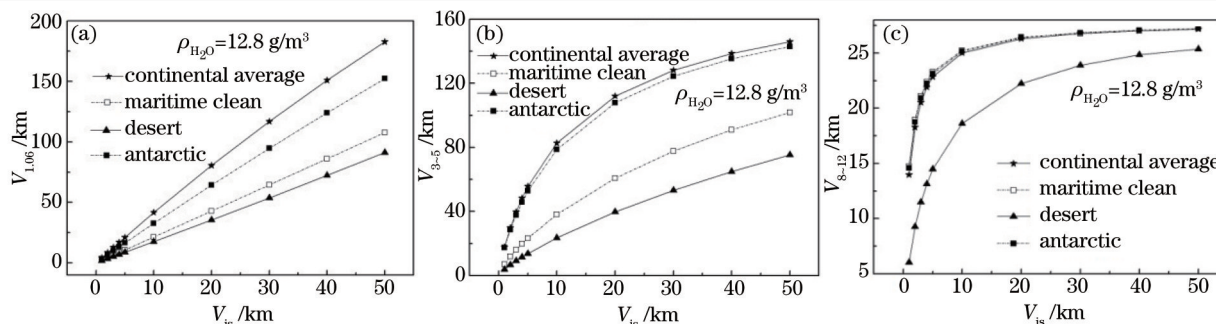


图4 不同气溶胶类型条件下(a)1.06、(b)3~5、(c)8~12 μm 波段大气能见度与可见光大气能见度的关系 ($\rho_{H_2O} = 12.8 \text{ g/m}^3$)

Fig.4 Dependence of the infrared atmospheric visibility on the visibility of visible light under different aerosol types at the wavelengths of (a) 1.06, (b) 3~5, (c) 8~12 μm ($\rho_{H_2O} = 12.8 \text{ g/m}^3$)

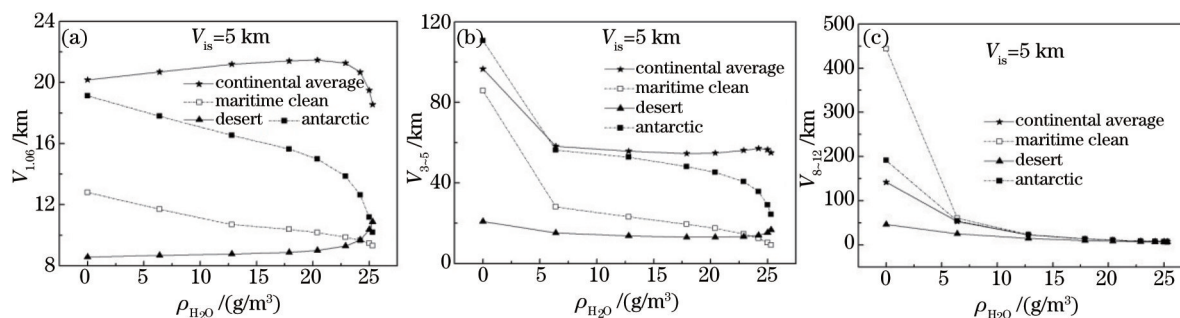


图5 不同气溶胶类型下(a)1.06、(b)3~5、(c)8~12 μm 波段大气能见度与水汽含量的关系 ($V_{is} = 5 \text{ km}$)

Fig.5 Dependence of the infrared atmospheric visibility on the water vapor content under different aerosol types at the wavelengths of (a) 1.06, (b) 3~5, (c) 8~12 μm ($V_{is} = 5 \text{ km}$)

城市型气溶胶由主要水溶性、不可溶性物质和烟灰组成,其变化曲线非常接近。同样,清洁海洋型、污染海洋型、热带海洋型气溶胶主要由水溶性物质、海盐(聚积模态)、海盐(粗模态)和烟灰组成,变化曲线也比较接近。而沙漠型气溶胶由水溶性物质、矿物质(核模态)、矿物质(聚积模态)和矿物质(粗模态)组成,与其他几种气溶胶类型的粒子组分差异很大,导致其红外大气能见度随可见光大气能见度、水汽含量的变化曲线较为特殊。此外,北极型气溶胶主要由水溶性、不可溶性物质、海盐(聚积模态)和烟灰组成,南极型气溶胶主要由硫酸盐、海盐(聚积模态)和矿物质组成,粒子组分的不同使得两种极地型气溶胶的变化曲线存在一定差别。

5 结 论

参考可见光大气能见度的定义,依据红外系统对比度阈值,提出了红外大气能见度的概念,用于表征大气对红外系统作用距离的影响,并建立了相应的计算模型,定量分析了可见光大气能见度、水汽含量、气溶胶类型对红外大气能见度的影响。从分析结果看出:红外大气能见度随可见光大气能见度的增大而增大;随水汽含量的增大而总体上呈减小的趋势;不同的气溶胶类型由于粒子组分的不同而形成不同的变化曲线,但具有较为一致的变化趋势。

实际应用中,通过测量近地面大气背景辐射得到相应背景亮温,利用红外系统给定的波段范围及噪声等效温差计算出相应的对比度阈值,然后根据应用地区的实际情况大致判断气溶胶粒子的类型,结合实测可见光大气能见度及水汽含量或湿度,即可得到相应波段的红外大气能见度。

参 考 文 献

- 1 Richard D Hudson, Jr. Infrared System Engineering[M]. New York: Wiley-Interscience, 1969: 245-246.
R D 小哈得逊. 红外系统原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1975: 245-246.
- 2 Rao Ruizhong. Modern Atmospheric Optics[M]. Beijing: Science Press, 2012.
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- 3 Rao Ruizhong. Vision through atmosphere and atmospheric visibility[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2486-2492.

- 饶瑞中. 大气中的视觉和大气能见度[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2486–2492.
- 4 W E Knowles Middleton. Vision through the Atmosphere[M]. Toronto: University of Toronto Press, 1952: 103–109.
- 5 Koschmieder H. Theorie der horizontalen sichtweite[J]. Beitr Phys Frei Atmos, 1924, 33(12): 171–181.
- 6 George J Zissis, Joseph S Accetta, David Shumaker. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook, Sources of Radiation[M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993: 8–20.
- 7 Xing Qiang, Ren Haigang, Chen Hanping, *et al.*. Simulation of infrared thermal image through atmospheric transmission[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(1): 43–46.
- 邢 强, 任海刚, 陈汉平, 等. 经过大气传输的红外热像仿真[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 43–46.
- 8 Guan Shanghong, Wang Biyi, Zhao Wanli, *et al.*. Study of temperature measurement precision base on infrared thermal imager[J]. Electro-Optic Technology Application, 2012, 27(3): 85–88.
- 官上洪, 王毕艺, 赵万利, 等. 红外热像仪测温精度分析[J]. 光电技术应用, 2012, 27(3): 85–88.
- 9 Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, *et al.*. Atmospheric Physics[M]. Beijing: Beijing University Press, 2013: 66–72.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2013: 66–72.
- 10 Li Xuebin, Xu Qingshan, Wei Heli, *et al.*. Study on relationship between extinction coefficient and mass concentration[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(9): 1655–1658.
- 李学彬, 徐青山, 魏合理, 等. 气溶胶消光系数与质量浓度的相关性研究[J]. 光学学报, 2008, 28(9): 1655–1658.
- 11 Xu Mengchun, Xu Qingshan, Bian Jian, *et al.*. Extinction coefficient of stratified atmosphere measured by sun-photometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1201002.
- 徐梦春, 徐青山, 边 健, 等. 基于太阳光度计测量确定分层大气消光系数[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1201002.
- 12 Gong Chunwen, Li Xuebin, Li Jianyu, *et al.*. New method of aerosol extinction coefficient measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0101001.
- 宫纯文, 李学彬, 李建玉, 等. 大气气溶胶消光系数测量新方法[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0101001.
- 13 M Hess, P Koepke, I Schult. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC[J]. Bulletin of American Meteorological Society, 1998, 79(5): 831–844.
- 14 Chen Xiuhong. Development of the Combined Atmospheric Radiative Transfer Software[D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010: 53–58.
- 陈秀红. 通用大气辐射传输软件 CART 研制[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2010: 53–58.

栏目编辑: 史 敏