

不同地域大气对中远红外辐射传输的影响

张 芳^{1,2}, 齐琳琳², 吉 薇², 王 举¹

¹解放军理工大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101;

²空军装备研究院航空气象防化研究所, 北京 100085

摘要 在分析实际大气环境参数的差异和目标-背景辐射强度的基础上, 利用 MODTRAN 模式分析了东海、西北区域 3.9 μm 和 9.2 μm 波段的大气透射率和目标背景对比度的逐月分布特征; 为了分析实际大气、气溶胶效应对目标-背景辐射传输的综合影响, 结合局部地区月平均环境参数进一步探讨了上述两个区域内气溶胶对 3.9 μm 和 9.2 μm 波段的大气透射率和目标背景对比度分布的影响。结果表明, 大气温度、水汽混合比等参数对大气透射率和目标背景对比度有影响, 东海区域目标背景对比度比西北区域的小; 3.9 μm 处两区域的目标背景对比度不仅比 9.2 μm 处的小, 而且受到气溶胶的衰减作用比 9.2 μm 处的强, 因此在目标识别中应优先考虑使用 9.2 μm 作为工作波段。

关键词 大气光学; 大气红外辐射; 大气廓线; 气溶胶; 大气透射率; 目标背景对比度

中图分类号 O432.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0401002

Influence of Atmosphere in Different Areas on Middle-Far Infrared Radiation Transmission

Zhang Fang^{1,2}, Qi Linlin², Ji Wei², Wang Ju¹

¹ College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 211101, China;

² Institute of Aeronautical Meteorological, Air Force Academy of Equipment, Beijing 100085, China

Abstract Based on the analysis of the difference among the actual atmospheric environment parameters and the target-background radiation intensity, the monthly distribution characteristics of atmospheric transmissivity and target-background contrast in east China sea area and northwest area at 3.9 μm and 9.2 μm are analyzed by the MODTRAN mode. In order to study the comprehensive influence of actual atmosphere and aerosol on target-background radiation transmission, a further research about the influence of aerosol effect on the distributions of atmospheric transmissivity and target-background contrast at 3.9 μm and 9.2 μm is carried out combined local region monthly average environmental parameters. The result shows that the atmospheric parameters of atmospheric temperature and water vapor mixing ratio have influence on the distributions of atmospheric transmissivity and target-background contrast. The target-background contrast in east China sea area is always lower than that in northwest area. The target-background contrast at 3.9 μm is not only lower than that of 9.2 μm in the two areas, but also suffers more aerosol attenuation. Therefore, the 9.2 μm is highly recommended as the working wavelength in the target identification.

Key words atmospheric optics; atmospheric infrared radiation; atmospheric profile; aerosol; atmospheric transmissivity; target-background contrast

OCIS codes 340.6720; 110.7440; 100.5070

收稿日期: 2016-08-08; 收到修改稿日期: 2016-11-17

作者简介: 张 芳(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事大气对光电系统作用距离影响方面的研究。

E-mail: 475613323@qq.com

导师简介: 齐琳琳(1973—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事军事气象水文预报保障方面的研究。

E-mail: niceqll@mail.iap.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

近年来,随着探测器件性能的不不断提高,大多数红外探测系统成为对比度限制的系统^[1-2]。红外探测系统对目标的发现、识别和跟踪主要依据目标与背景的红外辐射特性以及两者的对比特性^[3]。然而,红外探测系统接收目标与背景的红外辐射过程非常复杂,接收效果与大气状态、景物特征、路径等有关,如科索沃战争中恶劣的气象条件使美军导弹的作战性能受到很大限制^[4]。但是,军事方面基于真实环境的目标和大气红外辐射特性的研究应用还不够成熟。因此,基于特定地区的大气环境参数特征并依据辐射传输原理开展不同大气背景下的红外辐射透过特性的研究,对深入探讨大气环境对制导武器攻击效能的影响具有重要意义。

研究实际大气环境中目标和背景的红外辐射特征对于提升红外探测系统的性能具有重要意义。谢民勇等^[5]通过一天内不同时间的外场实验发现,目标背景对比度不仅和材料有关,而且其在一天内随温度的变化很大。王毅等^[6]采用 MODTRAN 模式自带的大气廓线数据,分析了大气在红外波段对目标背景对比度的影响,发现季节变化会改变目标背景对比度的大小。齐琳琳等^[7]对比了南海区域和 MODTRAN 模式自带的大气特征,分析了两者在不同能见度和气溶胶下红外辐射透过特性的偏差。本文使用 2014 年的探空数据,提取出东海(120°~140°E,20°~35°N)和西北(73°~105°E,35°~45°N)区域的月平均大气廓线,对比了其与实际标准大气廓线的差异。建立了巡航导弹蒙皮辐射强度计算模型,利用 MODTRAN 模式对比分析了东海、西北地区与标准大气下 3.9 μm 和 9.2 μm 处大气透射率和目标背景对比度的逐月分布特征,从而探讨了实际大气对中远红外目标和背景辐射传输的影响。此外,随着气溶胶研究的不断推进,气溶胶类型对中远红外辐射传输的重要影响也不可忽视。刘丹丹等^[8]分析了 MODTRAN 模式自带的 5 种对流层气溶胶和背景平流层气溶胶对大气透射率的影响,发现气溶胶类型和能见度对大气透射率的影响不可忽略。王红霞等^[9]利用蒙特卡罗法分析了不同气溶胶类型的气溶胶衰减特性,发现不同的气溶胶类型在不同波段处的消光能力不同。为此,在实际大气廓线逐月分析的基础上,本文还分别考虑了东海和西北区域的海洋型和沙漠型气溶胶效应,通过在模型中输入这两个区域 2014 年月平均地面 10 m 风速和相对湿度观测值来计算局部地区气溶胶强度,综合探讨了大气廓线、气溶胶影响下红外探测波段对大气透射率和目标背景对比度的特征。

2 不同地域大气特征分析

不同的大气环境有不同的红外辐射特性及透过特性,MODTRAN 模式中只提供了美国空军地球物理实验室按纬度划分的 6 种大气模式,而我国地理分布复杂,大气条件千差万别,仅利用这 6 种大气模式研究我国的大气特征会带来误差^[10]。饶瑞中等^[11]指出简单套用外国的大气模式不仅技术上不可靠,而且会产生不同层面的误导作用,甚至可能带来严重后果,应对中国各个典型地区进行大气光学特性的系统测量和数据分析,以获得典型地区大气光学特性的统计特征。这里以东海和西北为研究区域,采用 2014 年区域内的探空数据,利用多元大气的压高公式求得以几何高度为垂直坐标的上述两区域逐月大气廓线的平均值。

为了说明我国不同时空下大气环境参数及其分布与标准大气的差异,将上述两区域实际大气廓线与标准大气的进行了对比分析;分别选取两区域春季(3~5 月)、夏季(6~8 月)、秋季(9~11 月)和冬季(12,1,2 月)中的 3,6,9,12 月作为代表月份,对比分析了两区域各代表月份和标准大气的压强、温度和水汽混合比的差异。图 1、2 分别为两区域中大气和标准大气的压强、温度、水汽混合比分布廓线,分析只针对实际大气探测数据高度(10 km 以下)进行。

由图 1(a)、(b)可知,东海地区大气压强、温度的廓线分布与标准大气差异不大。东海地区地面气压范围为(1.007~1.024)×10⁵ Pa,标准大气的气压仅为 1.013×10⁵ Pa。东海地区 9 月的地表温度比标准大气的温度高 10℃,且在 3 km 以上,4 个代表月份内的温度都高于标准大气的温度。由图 1(c)可以看出,东海区域在 6、9 月的大气含水量明显多于 3、12 月以及标准大气的含水量,其中 9 月地表水汽混合比比标准大气的水汽混合比高约 10 g/kg。

从图 2 可以看出,标准大气和西北区域大气的气压和温度的廓线类似,但是西北地区地面的温度变化较大,4 个月内的温度变化范围为-3~26℃。从水汽混合比廓线可以明显看出,西北地区各月的大气含水量与标准大气的含水量明显不同。

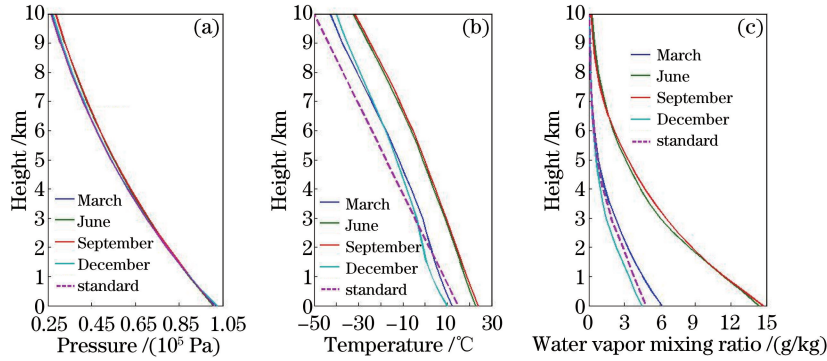


图 1 东海区域大气与标准大气的月平均(a)大气压强、(b)温度和(c)水汽混合比的廓线对比
Fig. 1 Comparison of profiles of monthly average (a) atmosphere pressure, (b) temperature and (c) water vapor mixing ratio of atmosphere in east China sea area with those of standard atmosphere

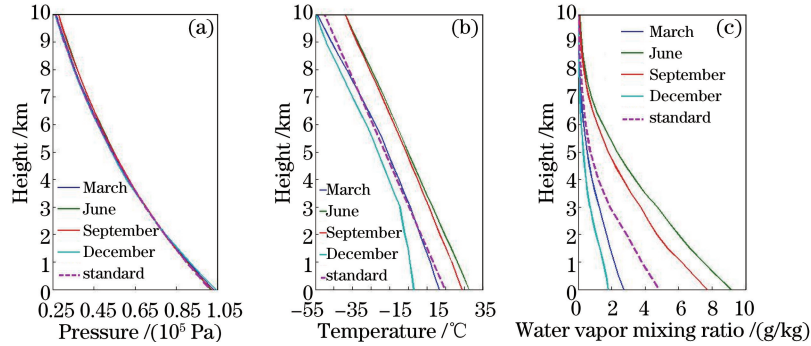


图 2 西北区域大气与标准大气的月平均(a)大气压强、(b)温度和(c)水汽混合比的廓线对比
Fig. 2 Comparison of profiles of monthly average (a) atmosphere pressure, (b) temperature and (c) water vapor mixing ratio of atmosphere in northwest region with those of standard atmosphere

对比图 1、2 可以直观地看出,两区域大气参数存在显著差异,这些差异会导致在计算大气背景红外辐射以及大气透射率时出现计算误差,特别是 10 km 以下的大气背景红外辐射以及大气透射率的计算误差比较明显。因此,有必要开展不同区域的实际大气对中远红外辐射传输和目标识别影响的研究。

3 对比度计算和目标红外辐射建模

3.1 对比度算法

对比度的计算方法采用文献[12-13]提供的计算公式,整理可得

$$C_{ob} = \left| \frac{I_o^* - I_b^*}{I_b^*} \right| = \left| \frac{I_o - I_b^\downarrow(\tau_t)}{I_b^\downarrow(\tau_o)} \right| \exp(-\Delta\tau/\mu) = \left| \frac{I_o - I_b^\downarrow(\tau_t)}{I_b^\downarrow(\tau_t)} \right| \left| \frac{I_b^\downarrow(\tau_t)}{I_b^\downarrow(\tau_o)} \right| \exp(-\Delta\tau/\mu), \quad (1)$$

式中 C_{ob} 为目标背景对比度, I_o^* 为观测到的目标亮度, I_b^* 为目标处背景亮度, I_o 为目标固有亮度, $I_b^\downarrow(\tau_t)$ 为目标处向下的背景亮度, $I_b^\downarrow(\tau_o)$ 为仪器接收到的向下的辐射强度, $\Delta\tau$ 为仪器和目标之间的光学厚度差 ($\Delta\tau = \tau_o - \tau_t$), μ 为观测天顶角余弦。

$\left| \frac{I_o - I_b^\downarrow(\tau_t)}{I_b^\downarrow(\tau_t)} \right|$ 为目标背景的固有对比度,用 C_o 表示,则(1)式可简化为

$$C_{ob} = C_o \left| \frac{I_b^\downarrow(\tau_t)}{I_b^\downarrow(\tau_o)} \right| \exp(-\Delta\tau/\mu). \quad (2)$$

3.2 目标蒙皮辐射

以战斧 4 巡航导弹为目标,巡航导弹具体参数为:飞行速度 $V=0.7 Ma$, 导弹长度 $L=5.56 m$ (含助推器时, $L=6.42 m$), 导弹直径 $R=0.527 m$ [14]。根据文献[15]的多项式拟合方法,拟合出以波长 λ 为自变量、以发射率 ϵ_λ 为因变量的抗氧化涂层材料光谱发射率曲线,拟合方程可表示为

$$\epsilon_\lambda = 8.507 \times 10^{-1} + 1.129 \times 10^{-1} \lambda - 3.348 \times 10^{-2} \lambda^2 + 4.518 \times$$

$$10^{-3}\lambda^3 - 2.826 \times 10^{-4}\lambda^4 + 6.658 \times 10^{-6}\lambda^5. \quad (3)$$

根据(3)式,可以得到波段为 $3.9 \mu\text{m}$ 和 $9.2 \mu\text{m}$ 处的发射率 ϵ_λ 分别为 0.9904 和 0.9883。忽略导弹舵机的影响,弹体的辐射面积为^[16]

$$A_t = \begin{cases} 2LR \sin \theta, & 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \\ 2LR \sin \theta - \pi R^2 \cos \theta, & 90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \end{cases}, \quad (4)$$

式中 θ 为探测角度。

忽略尾焰和尾喷口辐射的影响,设导弹在水平方向平稳飞行,飞行高度为 2 km。蒙皮在飞行中因气动加热产生的红外辐射由两部分组成:蒙皮辐射和太阳反射。由于太阳反射的计算十分复杂,因此只考虑蒙皮辐射。蒙皮气动加热温度的表达式为^[17]

$$T_1 = T_b(1 + 0.164M^2), \quad (5)$$

式中 T_1 、 T_b 分别为目标温度和环境温度, M 为目标飞行的马赫速度。将 T_1 代入 Planck 函数,得到蒙皮辐亮度 $I_\lambda(T)$ 为

$$I_\lambda(T) = \frac{2hc^2\epsilon}{\lambda^5 \{ \exp [hc / (K\lambda T_1)] - 1 \}}, \quad (6)$$

式中 λ 为波长, ϵ 为蒙皮有效辐射率, c 为光速, K 为玻尔兹曼常数, h 为普朗克常数。根据(6)式可以得到特定波长和温度下的蒙皮辐亮度。

从图 3 中可以看出,目标辐亮度主要由 2 km 高度的环境温度决定,温度高的月份则辐亮度大。对比两个区域和两个波段,东海区域目标辐亮度总比西北地区的大;波段为 $9.2 \mu\text{m}$ 处的目标辐亮度比 $3.9 \mu\text{m}$ 处大 1~2 个数量级。

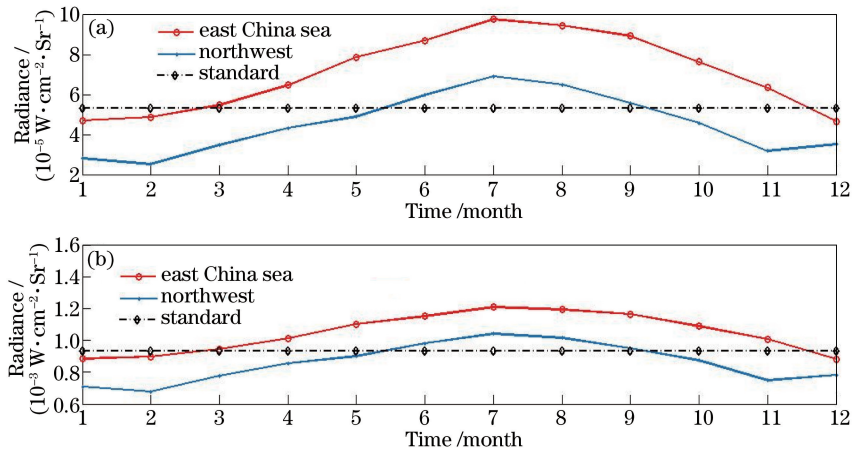


图 3 西北、东海区域大气和标准大气下逐月目标辐亮度分布。(a) $3.9 \mu\text{m}$; (b) $9.2 \mu\text{m}$

Fig. 3 Monthly distributions of target radiance in east China sea atmosphere, northwest atmosphere and standard atmosphere. (a) $3.9 \mu\text{m}$; (b) $9.2 \mu\text{m}$

3.3 目标和背景在探测器上的辐亮度

图 4 中 L_b 为背景辐亮度, A_t 为目标辐射面积, A_d 为探测器面积, f 为光学系统的焦距, A_0 为光学系统的入瞳面积, ω 为红外系统的瞬时立体视场角($\omega = A_d / f^2$), R 为系统和目标的距离,系统能扫射到的背景总面积 $A_s = \omega R^2$ 。由图 4 可知,当背景上无目标时,背景入瞳的辐射强度 E_b 为^[18]

$$E_b = L_b \omega \tau_a(R) \tau_0 A_0, \quad (7)$$

式中 $\tau_a(R)$ 为大气透射率, τ_0 为光学系统透射率。当系统扫过目标且目标尚未充满系统的入瞳时,在探测器靶面仍有部分面积接收背景辐射,设 ω_t 为目标对系统入瞳中心所张立体角,即 $\omega_t = A_t / R^2$ 。此时,背景入瞳的辐射强度 E'_b 为

$$E'_b = L_b (\omega - \omega_t) \frac{A_s - A_t}{A_s} A_0. \quad (8)$$

目标入瞳的辐射强度 E_t 为

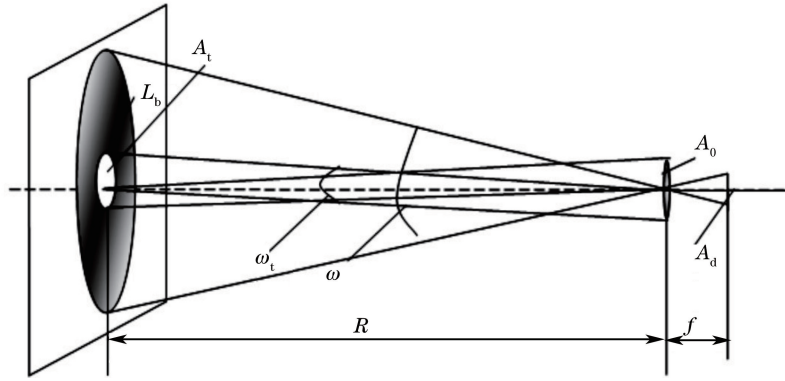


图 4 目标与背景辐射的几何示意图

Fig. 4 Geometry diagram of target and background radiation

$$E_t = L_t \omega_t \frac{A_t}{A_s} A_0, \quad (9)$$

式中 L_t 为目标辐亮度。大气入瞳的总辐射强度 E_0 为

$$E_0 = L_0 (\omega - \omega_t) \frac{A_s - A_t}{A_s} A_0, \quad (10)$$

式中 L_0 为仪器所在位置处的大气辐亮度,为路径辐亮度和大气背景辐亮度的和。探测器接收到的总辐射强度为大气总的辐射强度与目标辐射强度之和,可表示为

$$E_0 = L_0 (\omega - \omega_t) \frac{A_s - A_t}{A_s} A_0 + L_t \omega_t \frac{A_t}{A_s} A_0. \quad (11)$$

将(8)、(9)、(11)式计算得到的辐射强度分别代入(2)式中的 $I_b^\dagger(\tau_t)$ 、 I_0 、 $I_b^\dagger(\tau_0)$,即可计算得到目标背景对比度 C_{ob} 。

4 大气廓线对大气透射率和目标背景对比度分布的影响

下面计算中相关参数的取值为:观测天顶角 $\theta = 30^\circ$,观察者与太阳方位角之差为 60° ,目标和系统之间的高度差为 2 km,导弹长度 $L = 5.56$ m,导弹直径 $R = 0.527$ 。探测系统基本参数采用文献[19]中数据:探测系统瞬时立体视场角为 $1.5^\circ \times 1^\circ$,焦距为 300 mm,入瞳口径为 100 mm,光学系统的透射率 $\tau_0 = 0.6$ 。

4.1 不考虑气溶胶情况下区域实际大气的影晌分析

基于之前给出的对比度计算公式,利用 MODTRAN 模式逐月计算了波段为 $3.9 \mu\text{m}$ 和 $9.2 \mu\text{m}$ 时东海、西北区域的大气廓线、标准大气廓线以及分子衰减下的大气透射率和目标背景对比度。为了突出大气廓线对大气透射率和目标背景对比度的影响,模式设定都使用 MODTRAN 模式自带的标准大气分子数据计算分子衰减,并且忽略云、雨、气溶胶。图 5、6 分别给出了西北、东海区域的大气廓线和标准大气廓线下两波段的大气透射率和目标背景对比度的逐月分布。

从图 5 中可以看出,东海和西北区域大气廓线下两波段的大气透射率的逐月变化趋势一致,夏季的大气透射率最低,春、秋、冬三季的大气透射率较高,大气透射率整体变化趋势呈凹型。从全年来看,东海区域的大气透射率都比西北区域的低,而且两区域的逐月大气透射率与标准大气透射率都存在一定差异,其中 7 月份东海区域的大气透射率比标准大气的透射率低 0.07。通过对比发现,波段为 $3.9 \mu\text{m}$ 处的大气透射率总是比对应月份波段为 $9.2 \mu\text{m}$ 的大气透射率低。

由图 6 可以看出,东海和西北区域两波段的目标背景对比度的逐月分布和大气透射率的逐月分布基本一致,夏季目标背景对比度较小,冬季目标背景对比度较大,目标背景对比度整体呈凹型分布。东海区域目标背景对比度在 7 月最小,分别为 0.24 ($3.9 \mu\text{m}$)和 0.2 ($9.2 \mu\text{m}$);西北地区目标背景对比度在 6 月最小,分别为 0.22 ($3.9 \mu\text{m}$)和 0.27 ($9.2 \mu\text{m}$)。 $9.2 \mu\text{m}$ 处东海区域的目标背景对比度比西北地区的差,但是 $3.9 \mu\text{m}$ 处东海区域的目标背景对比度好于西北区域,这可能是由于计算中未考虑实际气溶胶的影响导致的;若计算中考虑气溶胶的影响,这一现象将会改变。两区域的目标背景对比度与标准大气的目标背景对比度差异明

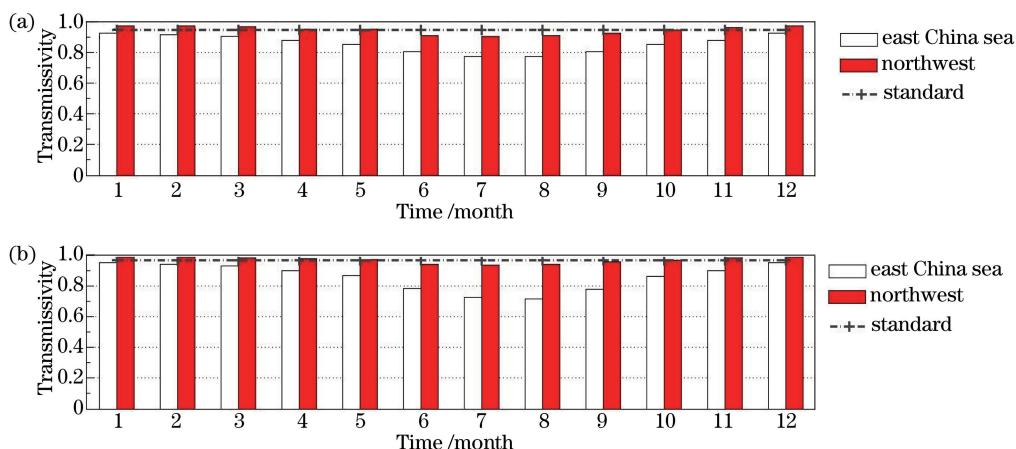


图 5 西北、东海区域大气廓线和标准大气廓线下逐月大气透射率分布。(a) $3.9 \mu\text{m}$; (b) $9.2 \mu\text{m}$

Fig. 5 Monthly distributions of atmospheric transmissivity under standard atmosphere profile and atmosphere profiles of east China sea and northwest regions. (a) $3.9 \mu\text{m}$; (b) $9.2 \mu\text{m}$

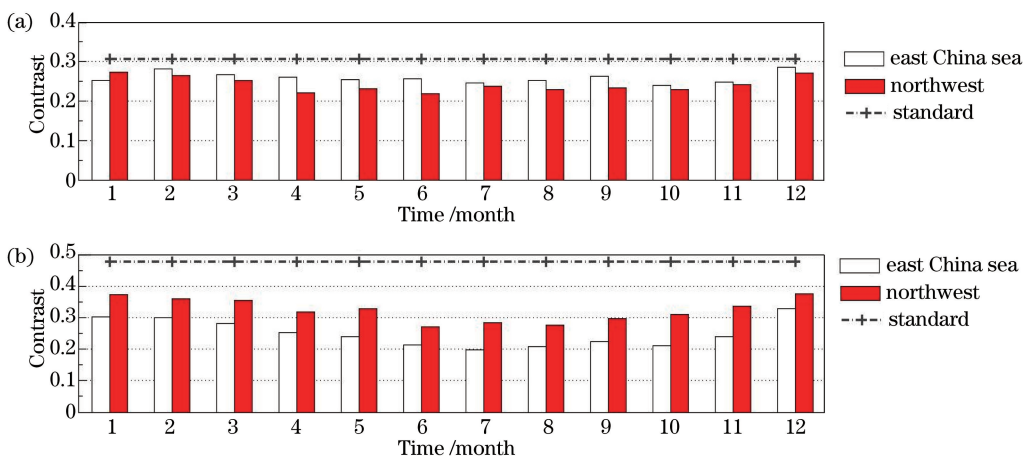


图 6 西北、东海区域大气廓线和标准大气廓线下目标背景对比度逐月分布。(a) $3.9 \mu\text{m}$; (b) $9.2 \mu\text{m}$

Fig. 6 Monthly distributions of target-background contrast under standard atmosphere profile and atmosphere profiles of east China sea and northwest regions. (a) $3.9 \mu\text{m}$; (b) $9.2 \mu\text{m}$

显,这说明大气廓线的差异对目标背景对比度的影响较大,而且对 $9.2 \mu\text{m}$ 处的目标背景对比度的影响更加明显。

由以上分析可知,大气廓线的差异对大气透射率和目标背景对比度的计算有显著影响。但是,在实际大气中,气溶胶同样随时空变化较大,也是影响大气衰减和辐射的重要因子。为了进一步对比分析我国区域实际大气透射率和目标背景对比度分布的差异,下文结合气溶胶类型讨论分析西北沙漠型和东海海洋型气溶胶下大气透射率、目标背景对比度的逐月分布特征。

4.2 不同气溶胶类型下大气透射率和目标背景对比度的分布

依据西北、东海区域的特点,分别将气溶胶类型取为沙漠型和海洋型,并且气溶胶消光强度的计算是通过模型中输入该区域实际月平均相对湿度和 10 m 风速后进行的。目标几何条件以及模式设定除气溶胶外同上,图 7、8 分别给出了综合考虑大气廓线、分子衰减和气溶胶影响下 $3.9 \mu\text{m}$ 和 $9.2 \mu\text{m}$ 大气透射率和目标背景对比度的逐月分布。

图 7 为考虑气溶胶后两区域大气透射率的逐月分布。与图 5 相比,可以看出大气透射率除受气溶胶衰减导致数值变小外,其分布特征整体趋势没有变化,且东海受到海洋型气溶胶的衰减作用更强。海洋型气溶胶在 $3.9 \mu\text{m}$ 处导致的大气透射率衰减大于 $9.2 \mu\text{m}$,而沙漠型气溶胶在 $9.2 \mu\text{m}$ 处导致的大气透射率衰减大于 $3.9 \mu\text{m}$,这可能是由于不同类型气溶胶的粒子来源不同^[9]。

图 8 为考虑了气溶胶后的目标背景对比度的逐月分布,与图 6 对比,可以看出除了由于气溶胶衰减导致

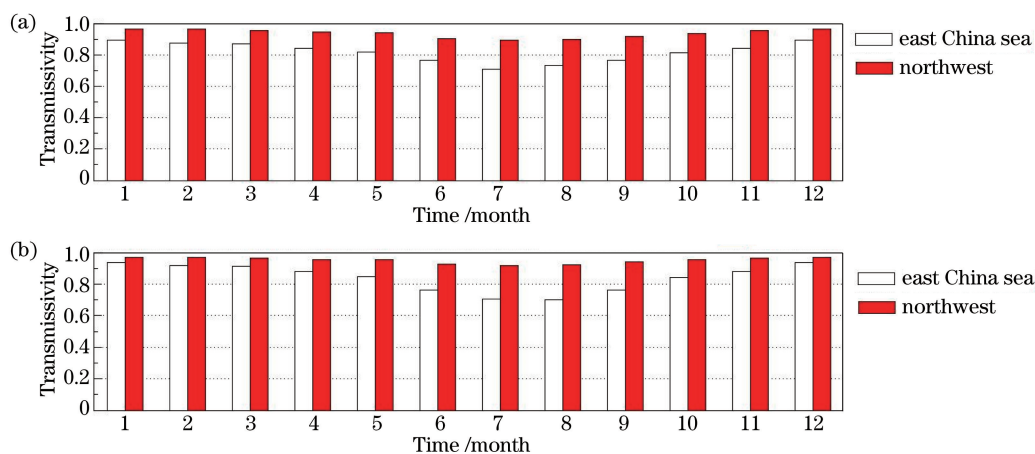


图 7 考虑气溶胶后两区域大气透射率的逐月分布。(a) $3.9 \mu\text{m}$; (b) $9.2 \mu\text{m}$

Fig. 7 Monthly distributions of atmospheric transmissivity with aerosol considered in two areas. (a) $3.9 \mu\text{m}$; (b) $9.2 \mu\text{m}$

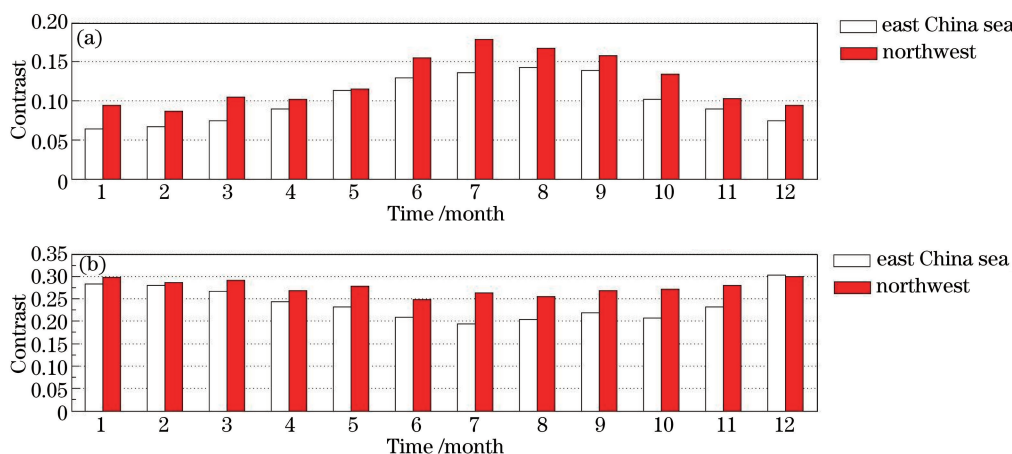


图 8 考虑气溶胶后两区域目标背景对比度的逐月分布。(a) $3.9 \mu\text{m}$; (b) $9.2 \mu\text{m}$

Fig. 8 Monthly distributions of target-background contrast with aerosol considered in two areas. (a) $3.9 \mu\text{m}$; (b) $9.2 \mu\text{m}$

的两区域两波段的对比度数值上有所减小外, $3.9 \mu\text{m}$ 处东海区域的目标背景对比度小于西北区域, 修正了前一节不考虑气溶胶时不符合常识的结论。但是, 东海和西北区域 $3.9 \mu\text{m}$ 处目标背景对比度的变化趋势却变成了夏季好于冬季, 一方面可能是因为目标模型中依据速度计算得到的目标温度偏低, 另一方面可能是因为考虑了气溶胶导致的大气辐射增强。另外, 可以看出 $3.9 \mu\text{m}$ 的目标背景对比度受到两种气溶胶的衰减都远大于 $9.2 \mu\text{m}$; 并且 $9.2 \mu\text{m}$ 处西北地区沙漠型气溶胶造成的目标背景对比度衰减大于东海区域海洋型。

综上分析可得, 气溶胶不仅对大气透射率和目标背景对比度有显著衰减作用, 而且局部地区气溶胶在不同段和不同区域对大气透射率和目标背景对比度的衰减强度存在较大差异, 所以根据区域特点选择红外系统工作波段, 并且调整红外系统参数对红外系统功能的正常发挥非常重要。

5 结 论

以 $3.9 \mu\text{m}$ 和 $9.2 \mu\text{m}$ 为研究波段, 探讨了东海和西北区域月平均大气廓线与标准大气廓线的差异; 为了定量分析这些差异对大气透射率和目标背景对比度的影响, 利用 MODTRAN 模式分别分析了东海、西北区域大气廓线和标准大气廓线下 $3.9 \mu\text{m}$ 和 $9.2 \mu\text{m}$ 处大气透射率和目标背景对比度逐月分布特征; 为了进一步分析局部地区气溶胶对大气透射率和目标背景对比度的影响, 在模式中分别输入区域月平均相对湿度和风速, 继续探讨了东海海洋型和西北沙漠型气溶胶对大气透射率和目标背景对比度的影响。经过分析可以得到以下结论。

1) 不同区域、不同季节的大气环境参数(如温度、水汽含量)的差异较大, 这些参数对中远红外大气辐射

传输造成明显影响,因此在实际应用中应考虑真实大气特征。

2) 综合考虑了大气廓线、分子衰减和气溶胶后,发现东海区域目标背景对比度比西北地区的差,3.9 μm 处的对比度比 9.2 μm 处的差,而且 9.2 μm 处冬季目标背景对比度好于夏季。

3) 对比计算了考虑气溶胶和不考虑气溶胶的大气透射率和目标背景对比度,可以看出海洋型和沙漠型气溶胶在 3.9 μm 和 9.2 μm 处的消光能力不同,并且 3.9 μm 处的目标背景对比度受到两种气溶胶的衰减都大于 9.2 μm ,因此认为 9.2 μm 更能满足实际应用要求。

参 考 文 献

- [1] Sadot D, Kopeika N S. Imaging through the atmosphere: Practical instrumentation-based theory and verification of aerosol modulation transfer function[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1993, 10(1): 172-179.
- [2] Kepeika N S. A system engineering approach to imaging[M]. Bellingham: SPIE, 1998: 331-356.
- [3] Han Yuge, Xuan Yimin. Effect of atmospheric transmission on IR radiation feature of target and background[J]. Journal of Applied Optics, 2002, 23(6): 8-11.
韩玉阁, 宣益民. 大气传输特性对目标与背景红外辐射特性的影响[J]. 应用光学, 2002, 23(6): 8-11.
- [4] Xu Genxing. Optical characteristics of object and environment[M]. Beijing: Space Navigation Press, 1995: 30-40.
徐根兴. 目标和环境光学特性[M]. 北京: 北京宇航出版社, 1995: 30-40.
- [5] Xie Minyong, Shen Weidong, Song Sihong, *et al.* Effectiveness evaluation of infrared stealth based in the contrast of target and background infrared radiation[J]. Infrared Technology, 2011, 33(2): 113-115.
谢民勇, 沈卫东, 宋斯洪, 等. 基于目标与背景红外辐射对比度的红外隐身效能研究[J]. 红外技术, 2011, 33(2): 113-115.
- [6] Wang Yi, Fan Wei, Rao Ruizhong. Effect of atmospheric and ground condition on the target-background contrast[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2004, 21(1): 92-97.
王 毅, 范 伟, 饶瑞中. 大气、地表条件对目标-背景对比度的影响分析[J]. 量子电子学报, 2004, 21(1): 92-97.
- [7] Qi Linlin, Ji Wei, Bai Jie, *et al.* Analysis of influence of atmosphere on infrared transmittance[J]. Command Control & Simulation, 2014, 36(1): 61-65.
齐琳琳, 吉 微, 白 洁, 等. 大气对红外制导波段透过特性的影响分析[J]. 指挥控制与仿真, 2014, 36(1): 61-65.
- [8] Liu Dandan, Huang Yinbo, Yan Zhengquan, *et al.* Influence of boundary layer aerosol model in the mid-infrared light-wave transmission[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(2): 189-193.
刘丹丹, 黄印博, 严正权, 等. 边界层气溶胶类型对中远红外光波传输的影响[J]. 激光与红外, 2015, 45(2): 189-193.
- [9] Wang Hongxia, Zhu Youzhang, Tian Tao, *et al.* Characteristics of laser transmission in different types of aerosols[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(2): 024214.
王红霞, 竹有章, 田 涛, 等. 激光在不同类型气溶胶中传输特性研究[J]. 物理学报, 2013, 62(2): 024214.
- [10] Chen Xiuhong, Wei Heli, Xu Qingshan. Infrared atmospheric transmittance calculation model[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(5): 811-816.
陈秀红, 魏合理, 徐青山. 红外大气透过率的计算模式[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 811-816.
- [11] Rao Ruizhong, Qiao Yanli, Wei Heli, *et al.* Research and application on optical properties of atmosphere in typical regions of China[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(6): 401-408.
饶瑞中, 乔延利, 魏合理, 等. 中国典型地区大气光学特性及其应用[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 401-408.
- [12] Liou K N. An introduction to atmospheric radiation[M]. New York: Academic Press, 2004: 27-33.
- [13] Wang Yi, Fan Wei, Rao Ruizhong. Analysis on the object-background contrast by numerical radiative transfer computation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(7): 848-852.
王 毅, 范 伟, 饶瑞中. 大气中目标背景对比度及其影响因素的数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(7): 848-852.
- [14] Ma He, Wu Ping, Sun Wenfang. Estimation of operating range of infrared system to cruise missile based on MODTRAN[J]. Infrared, 2013, 3(6): 26-31.
马 鹤, 吴 平, 孙文芳. 基于 MODTRAN 的红外系统对巡航导弹探测距离的估算[J]. 红外, 2013, 3(6): 26-31.
- [15] Zhang Yufeng, Dai Jingmin, Zhang Yu, *et al.* Correction method for infrared spectral emissivity measurement system based on integrating sphere reflectometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(8): 2267-2270.
张宇峰, 戴景民, 张 昱, 等. 基于积分球反射计的红外光谱发射率测量系统校正方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(8): 2267-2270.

2013, 33(8): 2267-2270.

- [16] Tang Yaowen, Zeng Hongjun. Modeling and simulation of infrared radiation characteristics of anti-ship missile[J]. *Infrared*, 2016, 37(7): 33-38.
唐尧文, 曾红郡. 反舰导弹红外辐射特性的建模与仿真[J]. *红外*, 2016, 37(7): 33-38.
- [17] Wang Jiang'an, Ma Zhiguo. Study of infrared radiation feature of dim point-targets under complicated background of sea and sky[J]. *Laser & Infrared*, 2003, 33(1): 48-50.
王江安, 马治国. 海空复杂背景下弱点目标红外辐射特征研究[J]. *激光与红外*, 2003, 33(1): 48-50.
- [18] Mu Da, Han Hongxia. Comparison and analysis for operating range equations of infrared system[J]. *Journal of Changchun University of science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 35(4): 5-9.
牟 达, 韩红霞. 红外系统作用距离方程的比较与分析[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 35(4): 5-9.
- [19] Feng Yunsong, Jin Wei, Lu Yuan, *et al.* Operating range analysis of infrared detection system to a stealth aircraft[J]. *Fire Control & Command Control*, 2014, 39(1): 153-156.
冯云松, 金 伟, 路 远, 等. 红外探测你系统对某隐形飞机作用距离分析[J]. *火力与指挥控制*, 2014, 39(1): 153-156.