

## 激光与光电子学进展

## 中远红外光谱区间的海区上空大气透过率特性分析

齐琳琳<sup>1\*</sup>, 王晓丹<sup>2</sup>, 吉微<sup>1</sup><sup>1</sup>93213 部队, 北京 100085;<sup>2</sup>92859 部队, 天津 300100

**摘要** 利用辐射传输计算模型,以海区实际大气温度、湿度、风等参数做输入,对 3~5  $\mu\text{m}$ 、8~12  $\mu\text{m}$  光谱区间的辐射传输透过特性进行了量化的分析,在此基础上还探讨了不同传输路径、不同云型遮挡对其传输透过率的影响。结果表明,地域性、季节性特征明显的温度、湿度等大气环境参数直接影响辐射传输透过率的计算,建立局地大气参数模式在光电工程的大气传输计算中要加以重视应用。

**关键词** 光谱学; 红外; 辐射传输; 实际大气; 透过率特性

中图分类号 O432

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0101002

## Analysis on Atmospheric Transmittance Characteristics of Middle-Far Infrared Spectrum in Ocean Area

Qi Linlin<sup>1\*</sup>, Wang Xiaodan<sup>2</sup>, Ji Wei<sup>1</sup><sup>1</sup>Unit 93213, Beijing 100085, China;<sup>2</sup>Unit 92859, Tianjin 300100, China

**Abstract** Input with the effects of the ocean's actual atmosphere, such as temperature, humidity, and wind, on the distribution characteristics of transmittance between 3-5  $\mu\text{m}$  and 8-12  $\mu\text{m}$  are quantitatively discussed using the radiative transfer model. The effects of different paths and the cloud type cover on the results of transmittance are also investigated. Results show that the regional and seasonal changes of atmospheric temperature, humidity, and other parameters are obvious, thereby directly affecting the calculation result of radiative transmittance. The establishment of a local atmospheric parameter model plays an important role in the calculation of atmospheric radiative transfer for photoelectric engineering.

**Key words** spectroscopy; infrared; radiative transfer; actual atmosphere; transmittance characteristic

## 1 引言

光电探测制导是精确制导武器采用的主要制导方式之一。尽管光电探测制导具有分辨能力强、命中精度高等优势,但大气环境、复杂背景、人为干扰等不确定因素对使用时作战效能的发挥都会有极大影响。如海区环境应用中,高温高湿、云的遮挡,以及海面反射光产生的亮带等,都会对目标的

精准探测和识别产生影响。此外,当前新兴发展的新型光电探测技术,如多/高光谱探测、偏振成像等,其关键技术也分别涉及光谱特征大气传输校正和恶劣大气模型的建立<sup>[1]</sup>。由此可见,了解复杂自然天气和环境对其的影响,有助于提升其全天时乃至全天候执行任务的自身适应性。

红外成像具有作用距离远、抗强光干扰性好、穿透能力强、可全天候工作等优点。为了最大程度地

收稿日期: 2021-04-02; 修回日期: 2021-04-12; 录用日期: 2021-04-27

通信作者: \*2304820835@qq.com

保证其实际应用性能,研制在各种复杂环境下都能准确捕获目标的红外制导系统就成为关键。红外系统对目标的发现、识别和跟踪主要依据目标与背景的红外辐射特性及其对比特性,目标红外辐射的接收效果与路径上的大气辐射传输息息相关<sup>[2-3]</sup>。传输过程中大气水汽分子等的选择性吸收,大气分子和气溶胶的散射,以及云雨等气象条件造成的衰减都会对辐射传输产生显著影响,而不同地域、季节和天气状况下这些影响因素的差异性很大<sup>[4-7]</sup>,因此,了解既定地区、既定时段的大气基本变化特征,并计算出相应条件下的红外辐射透过率特性,形成大气透过率数据库,这对于提高实际应用中基于对比度的红外系统作用距离计算的精准度具有重要意义。基于此目的,本研究综合考虑了大气廓线、气溶胶和云遮挡的影响,开展了基于中远红外光谱区间海区上空大气传输透过率特性的研究,更具有实际参考价值。

## 2 基于海区实际大气的红外辐射传输计算

目前对于大气辐射传输计算主要有查表法和大气辐射传输软件。相比而言,查表法的模型简单,精度较差,而 MODTRAN、LOWTRAN、FASCODE、CART 等辐射传输模型<sup>[8]</sup>则考虑了高分辨率光谱透射率和水平非均匀大气,更具有普适性和精准性。其中,MODTRAN 提供热带(15°N)、中纬度夏季(45°N,7月)、中纬度冬季(45°N,1月)、副极地夏季(60°N,7月)、副极地冬季(60°N,1月)和标准大气共 6 类大气分布廓线,具备反映大气参数随地理纬度和季节变化的能力,对全球大气平均状态而言具有了一定的精确度与实用性。但我国幅员辽阔,覆盖范围纬

度跨越大,大气条件千变万化,直接采用模型大气模式由于不能相对准确地反映我国特定地区大气的真实状态,从而会造成光谱特征的大气传输分析出现偏差。饶瑞中等<sup>[9]</sup>指出,简单套用外国的模式不仅在技术上不可靠,而且会产生不同层面的误导作用,甚至可能带来严重后果。由此可见,构建可以真实体现既定区域时空特点的大气参数分布廓线,对于确保大气辐射传输计算精确度是非常重要和必要的。

关于 MODTRAN 模型及其在大气辐射传输计算中的使用,齐琳琳等<sup>[6]</sup>已作过较为详细介绍。模型不仅对辐射传输路径、云和气溶胶模式等提供了多种选项,而且引入了多次散射计算方法可以使得精度得以提高。考虑到本文研究海区(0°~35°N、100°~150°E)上空大气观测资料匮乏,为确保数据的连续有效,研究采用了 2017 年美国国家环境预测中心(NCEP)大气再分析资料,通过按月逐日各时刻的温度、湿度、气压等空中气象要素相加求平均后,利用多元大气的压高公式求得以几何高度为垂直坐标的对应要素逐月相应时刻的平均值,构建出该海区的实际大气廓线并将其耦合到模型中。NCEP 大气再分析资料是由美国国家环境预报中心和国家大气研究中心协作,对来源于地面、船舶、无线电探空、探空气球、飞机、卫星等气象观测资料进行同化后研制的全球气象资料数据库,关于其在世界大洋各个区域的可信性评估已有相关研究<sup>[10]</sup>。对于二氧化碳、臭氧等随时间和地域变化不是很大的气体含量则采用与文献<sup>[11]</sup>同样的处理方式。

图 1、2 给出了研究海域逐月 0000UTC、1200UTC 的大气温度、湿度廓线分布。可以看出,

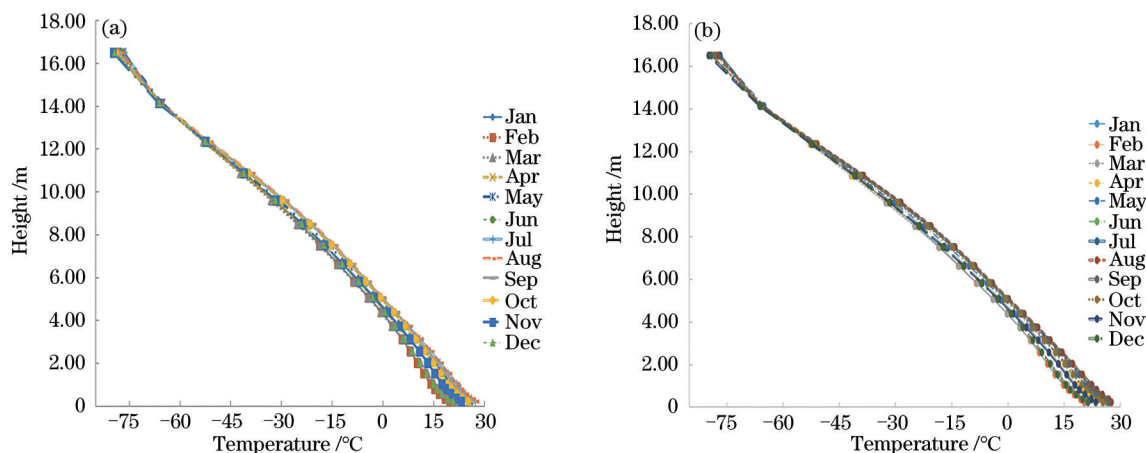


图 1 逐月大气温度随高度变化的分布。(a) 0000UTC ;(b) 1200UTC

Fig. 1 Monthly averaged atmospheric temperature distribution with height. (a) 0000UTC ;(b) 1200UTC

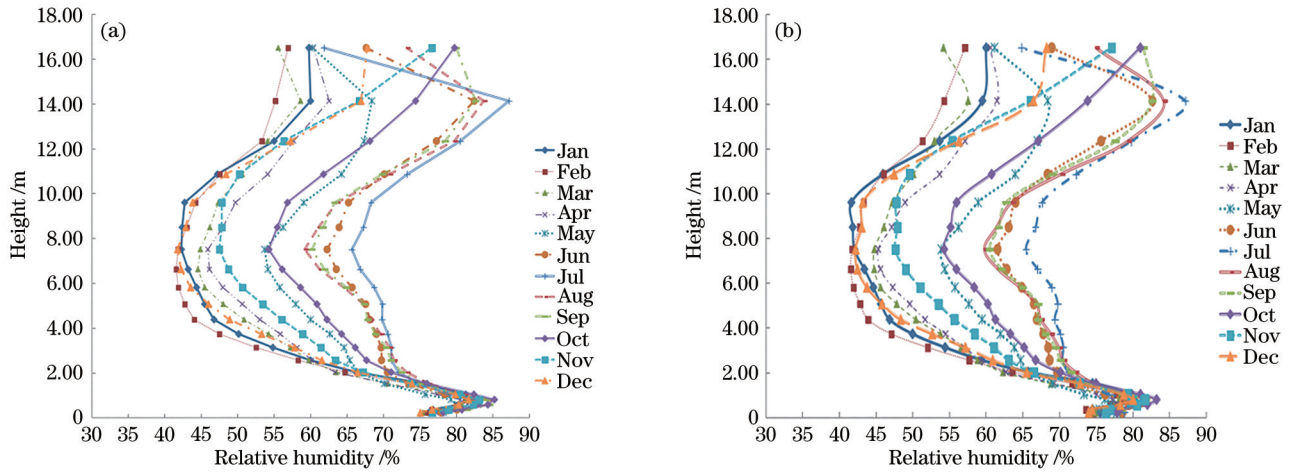


图 2 逐月大气湿度随高度变化的分布。(a) 0000UTC ;(b) 1200UTC

Fig. 2 Monthly averaged atmospheric humidity distribution with height. (a) 0000UTC ; (b) 1200UTC

同时刻下不同月份温度、湿度随高度变化是有明显差异的。大气温度是热辐射计算的重要参数,尽管差异相比小但也不能忽视其随时空变化的客观规律。相比而言,各月的大气湿度随高度变化差异较大,而其又是影响红外辐射大气传输的重要参数,必须采用符合区域特点和时空条件的数据加以应

用。图 3 则给出了以 1、4、7、10 月为代表月份的 0000UTC、1200UTC 两时刻温度、湿度的廓线分布。可以看出,同月份不同时刻下大气温度、湿度也是存在一定差异的,这进一步说明大气参数的地域性、季节性特征不容忽视,计算大气红外辐射透过率必须以研究区域的实际大气参数廓线做输入。

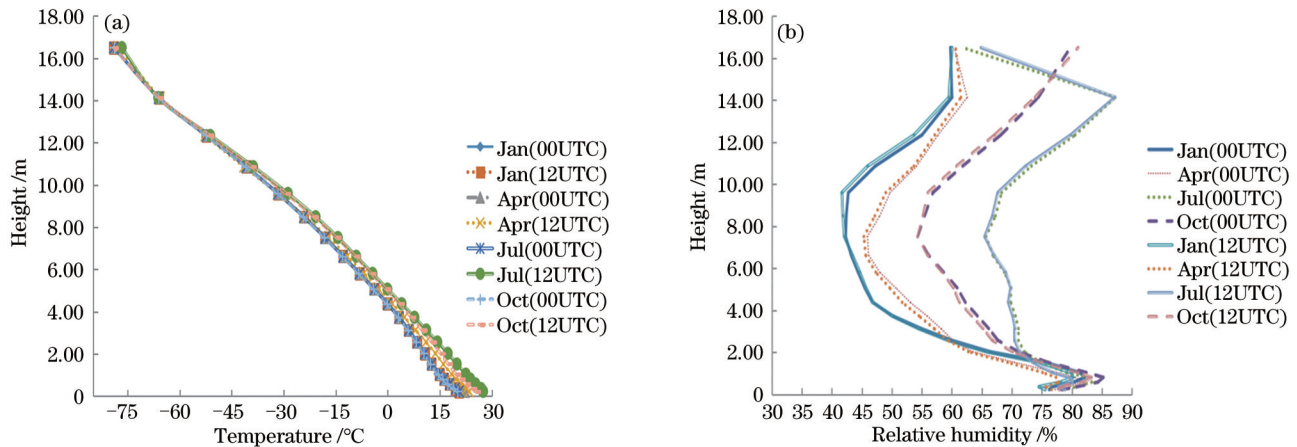


图 3 1、4、7、10 月 0000UTC 和 1200UTC 的高度变化分布。(a) 大气温度 ;(b) 大气湿度

Fig. 3 Distribution at 0000UTC, 1200UTC in Jan, Apr, Jul, Oct with height. (a) Atmospheric temperature; (b) atmospheric humidity

在针对中远红外光谱区间(3~5 μm, 8~12 μm)的透过率计算中,除采用上述海区逐月的实际大气参数廓线进行了逐月透过率特性随波长的变化分析外,还以 1、4、7、10 月为代表,重点分析了 0000UTC 和 1200UTC 不同时刻、高度距离变化的不同传输路径,以及不同云型遮挡下的透过率特性。计算中气溶胶类型定义为海洋型,其消光强度是通过输入实际月份的平均相对湿度和海表风速得到,相应的能见度设定为 5 km。对于采用辐射传输模式自带的大气气溶胶模型,陆川等<sup>[12]</sup>验证了不

同大气气溶胶模型下大气分子和气溶胶的吸收和散射特性对天空背景辐射亮度输出结果的影响分析,具有一定可信度。后续随着消光系数、吸收系数、散射系数以及不对称度因子等气溶胶参数探测手段的不断丰富<sup>[13-14]</sup>,可以采用模式自带气溶胶类型结合实际大气气溶胶数据做输入,重点针对气溶胶影响大气透过率特性开展一系列研究。此外,计算中三类云的云高、云厚是依据气候特征给出,即低云(云底高 0.6 km,云厚 0.5 km)、中高云(云底高 3.0 km,云厚 0.06 km)、中云(云底高 1.36 km,云厚



0.6 km)。由此可见,本研究对于海区上空大气透过率特性计算综合考虑了大气廓线、气溶胶和云遮挡效应的影响,相比以往研究中或只考虑实际大气而忽略云雨的影响,或只针对辐射传输模型自带 6 种大气的影响而言<sup>[15]</sup>,海区实际大气特点和参数精度均有改进,更具有实际参考价值。

### 3 良好天气下的大气透过率特性

#### 3.1 随月份的变化

不考虑云雨影响,以海区实际逐月 0000UTC 大气参数廓线为输入,图 4 和 5 给出了在高度为 800 m、

距离为 3000 m、俯仰角为 30° 的传输路径下,3~5 μm、8~12 μm 光谱区间逐月大气透过率的变化特征。可以看出,中远红外波段的透过率随月份变化整体呈凹型,即 1、2 月透过率相当,3 月开始减小,7 月达到最差,之后开始增大,直至 12 月透过率达到与 1、2 月的相当,处于全年最好状态。简而言之就是,该海域此条件下的透过率冬季最好,春秋次之,夏季最差。具体为 12、1、2 月相当,3 月次之,4 月与 11 月、5 月与 10 月相差不大,6 月好于 9 月,7 和 8 月相对最差。其中,对于 3~5 μm 波段而言,4.3~4.4 μm 水汽吸收波段内始终无透过,不适用于应用。3.6~

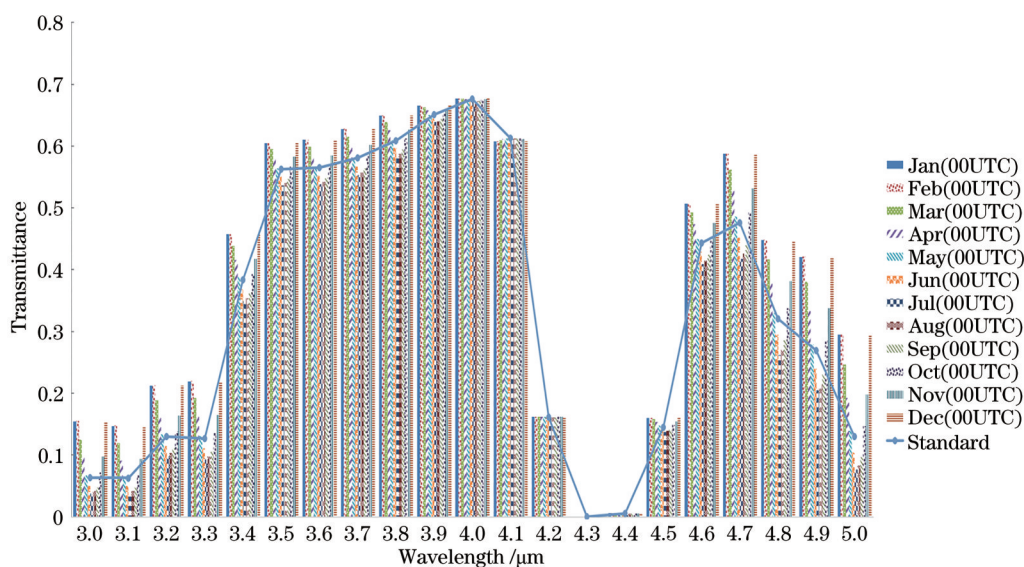


图 4 在高度 800 m、距离 3000 m、俯仰 30° 的传输路径上 3~5 μm 光谱区间的逐月大气透过率分布

Fig. 4 Monthly distribution of transmittance of 3-5 μm under the path with height of 800 m, distance of 3000 m and pitch of 30°

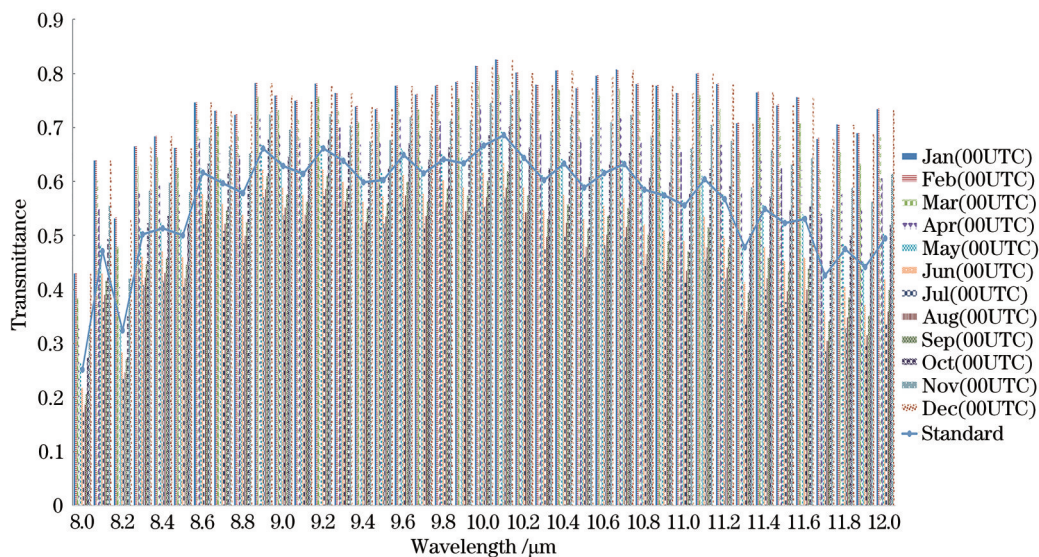


图 5 在高度 800 m、距离 3000 m、俯仰 30° 的传输路径上 8~12 μm 光谱区间的逐月大气透过率分布

Fig. 5 Monthly distribution of transmittance of 8-12 μm under the path with height of 800 m, distance of 3000 m and pitch of 30°



4  $\mu\text{m}$  透过率相对稳定且较大,其中 4~4.1  $\mu\text{m}$  各月透过率基本一致,为 0.6~0.68,较稳定。4.6~4.9  $\mu\text{m}$  的透过率次之。除水汽吸收波段外透过率随月份的凹状分布具体为 7 月最差,8 月次之,9、6、11、4、10、5、3、12、1、2 月逐渐变好,1、2、12 月,4、11 月,5、10 月均相差不大。而 3~3.4  $\mu\text{m}$  和 4.5~5  $\mu\text{m}$  波段的透过率随月份变化起伏变化大,峰值波段范围较大,不算是目标识别应用的理想波段。对于 8~12  $\mu\text{m}$  而言,透过率随月份变化的凹型分布更为明显,分布趋势与 3~5  $\mu\text{m}$  一致,也是夏季最差,冬季最好。两波段相比,3.6~4  $\mu\text{m}$  透过率相对稳定且较大,8~12  $\mu\text{m}$  的透过率相对均比较稳定,但冬夏差异始终较大。相比而言,除 6~9 月外,8~12  $\mu\text{m}$  的透过率较 3~5  $\mu\text{m}$  明显好很多,且以 9~9.4  $\mu\text{m}$ 、10~12  $\mu\text{m}$  波段的春秋和冬季透过率相对大,起伏波动小,更有利于目标识别使用。这与热成像技术最常用的谱段范围相一致。

此外,在其他条件一致情况下,两波段实际大气和标准大气透过率的变化趋势相同,但各月大气实际透过率在量值上与标准大气的相差明显。不考虑水汽吸收波段情况下,除 4~4.2  $\mu\text{m}$  各月透过率基本一致,且与标准大气的透过率也具有较高契合度外,其他波段基本均是 5 和 10 月实际大气透过率与标准的相近,6~9 月则均是实际大气明显低于

标准的,1~4 月和 11、12 月则是实际大气的透过率明显好于标准的。8~12  $\mu\text{m}$  均是 6~9 月实际大气的明显差于标准大气的,其他月份则明显好于标准大气的,其中,5 和 10 月的大气透过率与标准的差异相对其他月份的小些。由此可以看出,实际应用中如单纯采用标准大气而不考虑具体月份区分,对于冬春秋主要月份的透过率特性计算是会造成严重低估的,而 6~9 月则是严重高估。

对于高度 3500 m、距离 3000 m、俯仰  $-50^\circ$  传输路径下的 3~5  $\mu\text{m}$ 、8~12  $\mu\text{m}$  光谱区间逐月大气透过率而言,如图 6、图 7 所示,其分布变化趋势与之前传输路径上的透过率特性基本一致,也是冬季最好,春秋次之,夏季最差,但透过率量值上明显增大不少。这说明即使大气参数条件完全一致,但传输路径不同的中远红外光谱区间辐射传输透过率也是存在很大不同的。同样,该传输路径的两波段实际大气和标准大气透过率的变化趋势也是相同,但相比之前的路径,此条件下中远红外波段各月的透过率则是始终好于标准的,这再次说明,实际应用中如单纯采用标准大气而不结合传输路径加于具体实际月份大气参数使用,会对中远红外传输透过率特性造成误判,从而影响目标的识别捕获等。

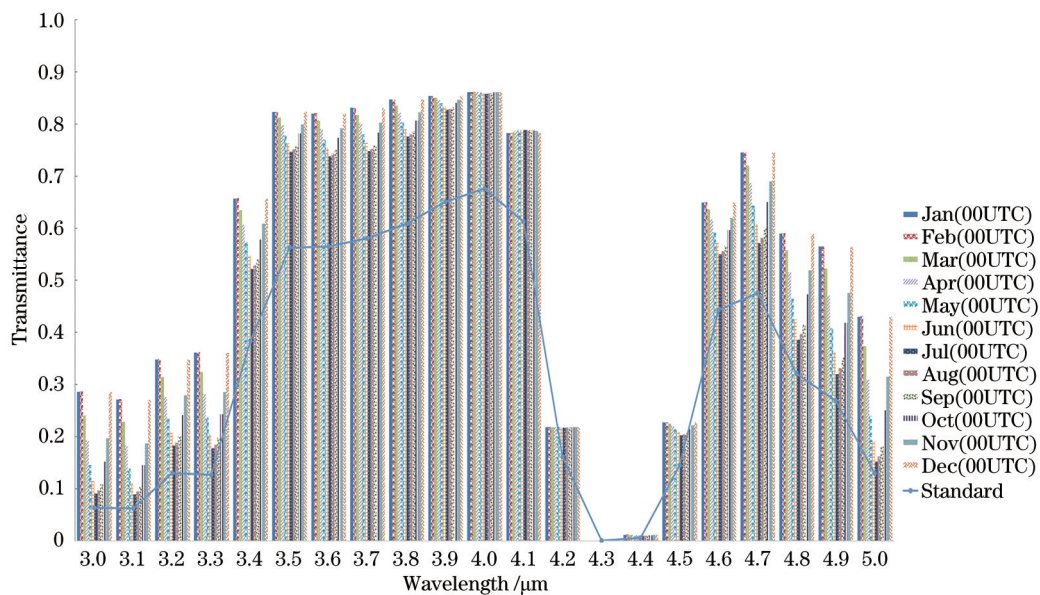


图 6 在高度 3500 m、距离 3000 m、俯仰  $-50^\circ$  的传输路径上 3~5  $\mu\text{m}$  光谱区间的逐月大气透过率分布

Fig. 6 Monthly distribution of transmittance of 3-5  $\mu\text{m}$  under the path with height of 3500 m, distance of 3000 m and pitch of  $-50^\circ$

### 3.2 随时刻的变化

在中远红外光谱区间逐月透过率特性分析基础上,还以 1、4、7、10 月为代表,重点分析了在高度为

800 m、距离为 3000 m、俯仰角为  $30^\circ$  的传输路径下 0000UTC 和 1200UTC 不同时刻中远红外光谱区间的透过率变化。如图 8 所示,两时刻的透过率从大到

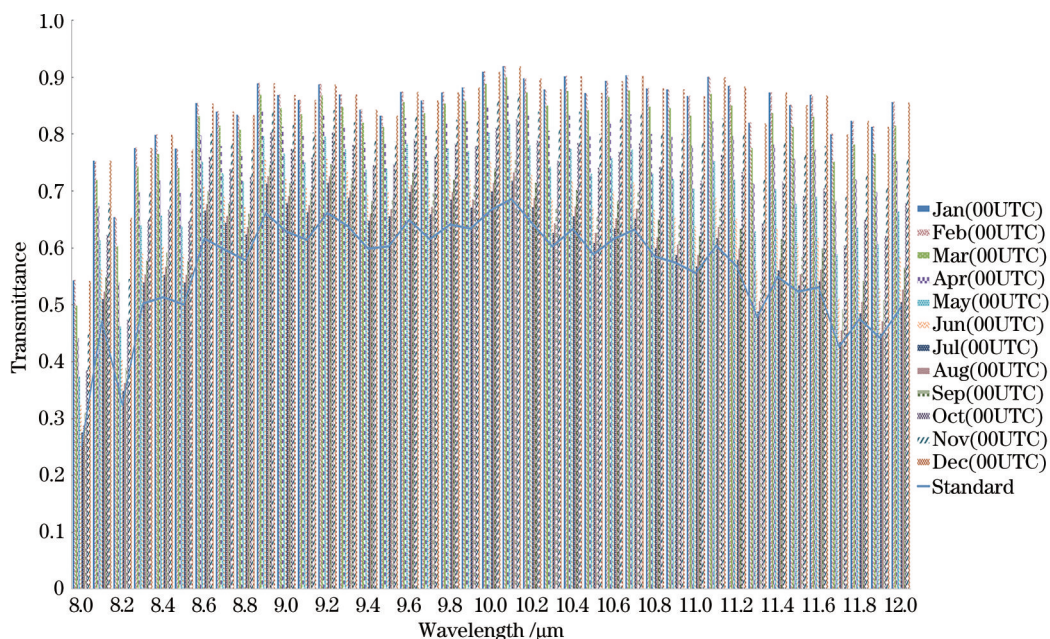


图 7 在高度 3500 m、距离 3000 m、俯仰 $-50^\circ$ 的传输路径上 8~12  $\mu\text{m}$  光谱区间的逐月大气透过率分布

Fig. 7 Monthly distribution of transmittance of 8-12  $\mu\text{m}$  under the path with height of 3500 m, distance of 3000 m and pitch of  $-50^\circ$

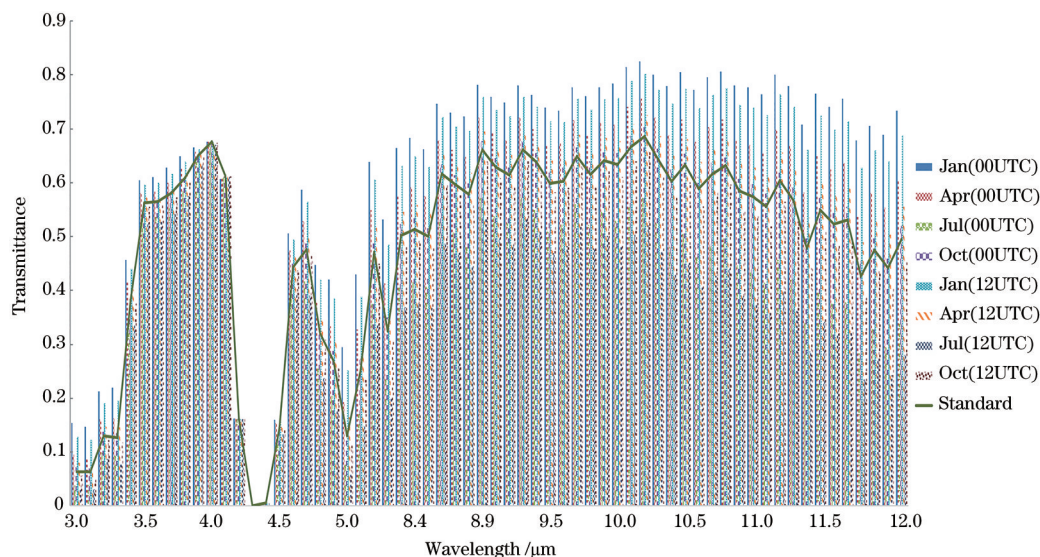


图 8 在高度 800 m、距离 3000 m、俯仰 $30^\circ$ 的传输路径上 3~5  $\mu\text{m}$ 、8~12  $\mu\text{m}$  光谱区间的 1、4、7、10 月 0000UTC 和 1200UTC 大气透过率分布

Fig. 8 Distribution of transmittance at 0000UTC, 1200UTC in Jan, Apr, Jul, Oct of 3-5  $\mu\text{m}$ 、8-12  $\mu\text{m}$  under the path with height of 800 m, distance of 3000 m and pitch of  $30^\circ$

小依次是 1、4、10、7 月,且始终是 0000UTC 的透过率好于 1200UTC 的透过率。其中,4~4.1  $\mu\text{m}$  无论是月份还是时刻的透过率始终基本一致,其他区间相比来看,月份和时刻间的光谱透过率差异就较为明显。3~5  $\mu\text{m}$  内 4 月 1200UTC 的大气透过与标准大气的较为接近,其余则相差较大。而 8~12  $\mu\text{m}$  区间内无论是月份还是时刻的透过率始终差异明显,与标准大气的透过率相比则是 7 月两时刻的,以及

10 月 1200UTC 的透过率始终差异较大,尤其是 7 月透过率差异相当明显,因此实际中不针对性地使用实际大气而一概采用标准大气,会造成较大的误差。

### 3.3 随高度的变化

既然逐月和不同时刻的中远红外光谱区间透过特性分析中均表明其与传输路径有关,为直观量化说明两者关系,以 1 月 0000UTC 大气为例,在传输距离 3000 m、俯仰 $30^\circ$ 不变的情况下,重点分析



了 3~5  $\mu\text{m}$ , 8~12  $\mu\text{m}$  透过率随波长和高度变化。如图 9 所示, 中波红外透过率特性始终是以 3.6~4  $\mu\text{m}$  为稳定和最佳, 4.6~4.9  $\mu\text{m}$  次之, 与高度无关。在传输路径有透过率的情况下, 既定波段的透

过率随高度增大而增强。相比而言, 同条件下长波红外透过率相对中波的稳定且良好, 也是既定波段的透过率随高度增大而增强, 以 9~9.4  $\mu\text{m}$ , 10~12  $\mu\text{m}$  透过率相对较强。

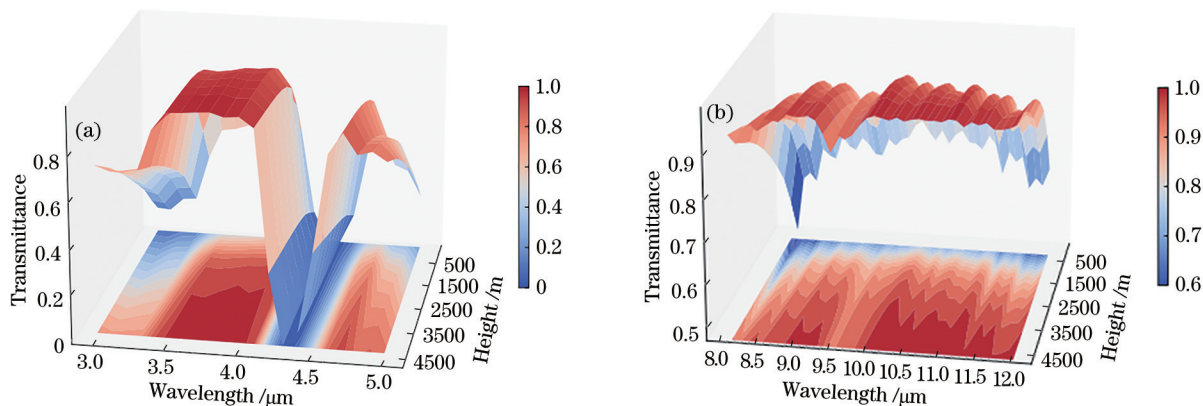


图 9 光谱区间 1 月 0000UTC 大气透过率随波长和高度的变化。(a) 3~5  $\mu\text{m}$ ; (b) 8~12  $\mu\text{m}$

Fig. 9 Variation of transmittance with wavelength and height at 0000UTC in Jan. (a) 3~5  $\mu\text{m}$ ; (b) 8~12  $\mu\text{m}$

综上所述, 海区不同月份、时段下的大气参数存在很大不同, 尤其以湿度差异最明显, 这直接影响中远红外光谱区间辐射传输的透过率特性, 使得透过率在相同波段内变化趋势不一样, 且波长对大气传输能力的影响也较大, 在实际应用中须予以考虑。相比而言, 海区上空 3.6~4  $\mu\text{m}$ , 9~9.4  $\mu\text{m}$ , 10~12  $\mu\text{m}$  红外光谱区间的辐射传输透过率相对稳定且良好, 可以作为红外波段目标识别的优选波段, 但也要结合具体传输路径加以应用。

#### 4 不同云型遮挡下的大气透过率特性

我国东南海域 4 km 高度内云出现的概率全年均在 40% 以上<sup>[16]</sup>, 且云对电磁波和光波的传输有重要的影响, 其类型、在视线路径上出现的概率均会对目标识别产生重要影响<sup>[17]</sup>, 因此有必要对海区上空云遮挡下的中远红外光谱区间辐射传输透过率特性予以考虑。仍以上述两种传输路径 1、4、7、10 月 0000UTC 的大气廓线输入为例, 针对 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~12  $\mu\text{m}$  波段还开展了低云(云底高 0.6 km, 云厚 0.5 km)、中高云(云底高 3.0 km, 云厚 0.06 km)、中云(云底高 1.36 km, 云厚 0.6 km)三种云型遮挡下的大气透过率特性分析。结果发现, 在高度为 800 m、距离为 3000 m、俯仰角为 30° 的传输路径上存在中低云遮挡时大气透过率均为零, 这应该与云

层阻挡视线路径上光传播, 从而直接影响到红外辐射传输透过率有关。而传输路径上是中高云时则始终有大气透过率, 且除 7 月外其他三个月的透过率强度还不算小, 最大可达 0.8 以上。这是因为其不仅不在光波路径上, 且超过一定距离, 所以对红外传输透过没有影响。对于高度为 3500 m、距离为 3000 m、俯仰角为 -50° 的传输路径则是存在低云时两波段存在极其微弱的大气透过率, 均小于 0.1。这说明即便云层在传输路径下方, 但距离百米左右很近距离时还是对会大气透过率有直接影响。而处于该传输路径之内的中云和中高云, 其遮挡下的大气则百分百无透过。

为了进一步说明云对传输路径上的透过率影响效果, 还以低云为例重点分析了传输路径受云遮挡变化影响的透过效果。结果发现, 在距离为 3000 m、俯仰角为 30°、高度为 1200 m 以下的传输路径上, 因云遮挡使得大气透过率始终为 0, 而从高度为 1200 m 开始就有微弱透过率, 到高度为 1500 m 时路径上已无云遮挡影响透过率陡然变好, 且随着高度增高透过率越来越好, 如图 10 所示。对于距离为 3000 m、俯仰角为 -50° 时, 高度为 4000 m 及以上的传输路径上透过率也是较为不错, 如图 11 所示。由此可见, 实际大气参数廓线、传输路径上云信息等的综合应用直接影响中远红外光谱区间的辐射传输透过率计算, 这在基于对比度的红外系统在距离计算的的实际应用中须加以重视。



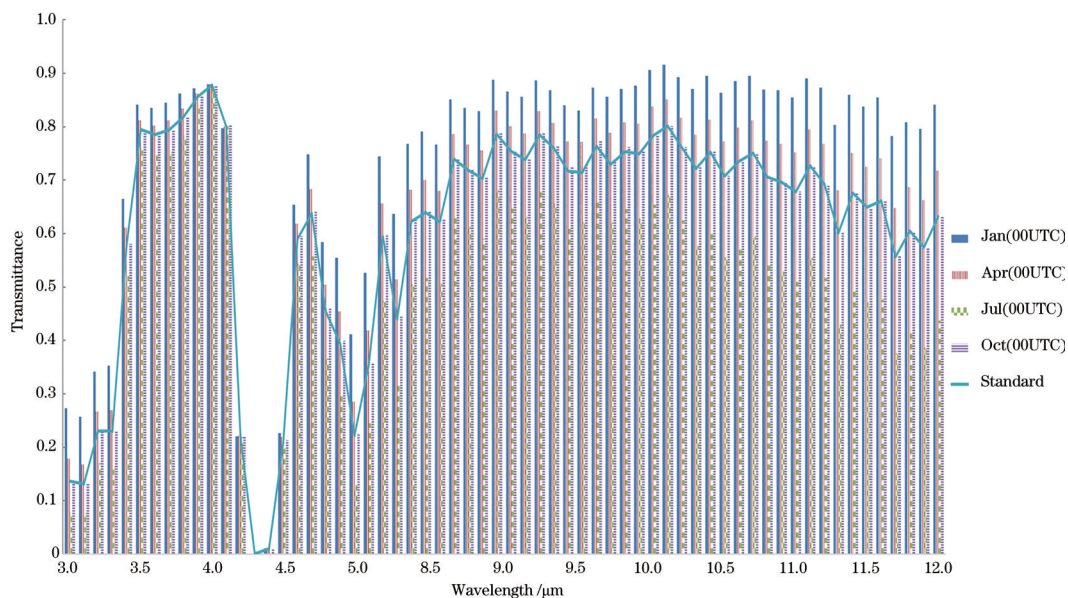


图 10 在高度 1500 m、距离 3000 m、俯仰 30° 的传输路径上 3~5 μm、8~12 μm 光谱区间的 1、4、7、10 月 0000UTC 低云遮挡下的大气透过率分布

Fig. 10 Distribution of transmittance at 0000UTC in Jan, Apr, Jul, Oct of 3~5 μm、8~12 μm under the low cloud and the path with height of 1500 m, distance of 3000 m and pitch of 30°

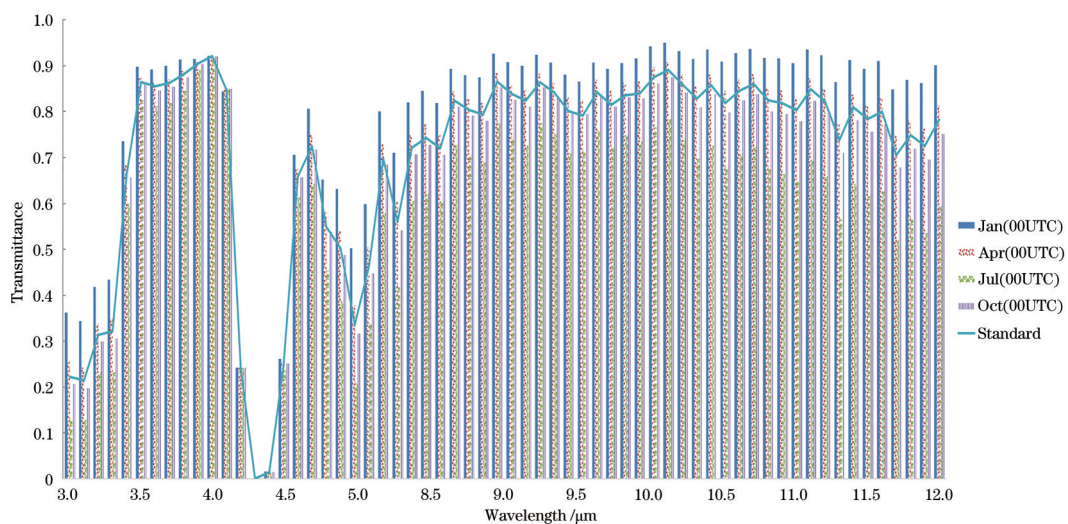


图 11 在高度 4000 m、距离 3000 m、俯仰 -50° 的传输路径上 3~5 μm、8~12 μm 光谱区间的 1、4、7、10 月 0000UTC 低云遮挡下的大气透过率分布

Fig. 11 Distribution of transmittance at 0000UTC in Jan, Apr, Jul, Oct of 3~5 μm、8~12 μm under the low cloud and the path with height of 4000 m, distance of 3000 m and pitch of -50°

## 5 结 论

红外辐射大气透过率特性研究随着红外技术的不断发展越来越受到重视。尽管目前红外辐射的大气透过率算法模型得到了较大改进,但由于气候多变造成的大气参数地域、季节的复杂性,使得辐射传输透过率特性规律在不同地域、不同季节、不同气象条件下的通用性不高,加大了准确、快速

计算基于对比度的红外系统作用距离的难度。随着海洋环境下光电制导系统的不断发展,海区中远红外光谱区间的辐射传输透过率特性的研究就显得尤为迫切。

本研究综合考虑了大气廓线、气溶胶和云效应对于海区上空大气透过率特性的影响,相比以往有的研究中只考虑实际大气而忽略云雨的影响,有的只针对辐射传输模型自带 6 种大气影响的研究结果

更具有实际参考价值。研究表明,海区不同月份、时段下的大气参数存在很大不同,尤其以湿度差异最明显,这直接影响中远红外光谱区间的辐射传输透过率特性。相比单纯使用标准大气得到的透过率而言,各月大气实际透过率在量值上与其相差明显,主要表现为冬、春季透过率被严重低估,而6~9月则是严重高估。尽管不同时刻、不同传输路径上的透过率特性变化趋势基本一致,但透过率量值上的差异还是较为明显的。其他条件相同时透过率随传输高度增大而增强,对不同高度、角度、距离、季节以及不同天气条件下的大气透过率特性必须加以区别。相比而言,海区上空3.6~4 μm、9~9.4 μm、10~12 μm红外光谱区间的辐射传输透过率相对稳定且良好,可以作为红外波段目标识别的优选波段,但传输路径上无论出现何种云型,只要是遮挡了光传播就会造成无透过,使得红外探测失效。而即便是云没有完全阻挡路径上的光传播,距离很近也会削弱太阳的影响,导致路径上多次散射占主导作用,使透过依然变得困难。

随着海洋环境下光电系统使用的不断增多,使其面临的环境日趋复杂,研究海区中远红外光谱区间辐射传输透过率特性,有助于提高武器装备海上条件下的适用能力和对抗能力。只有充分应用符合其使用地域气候特点的大气信息,深入研究和准确把握实际红外辐射大气透过率特性规律,才能切实提高应用中基于对比度的红外系统作用距离计算的精准度。

### 参 考 文 献

- [1] Song C, Jiang P, Duan L, et al. Application research of new photoelectric detection technology on precision guided weapons(Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20201015.  
宋闯, 姜鹏, 段磊, 等. 新型光电探测技术在精确制导武器上的应用研究(特约)[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(6): 20201015.
- [2] Zhang X, Liang X G. Development of and demands for infrared detectors[J]. *Electronics Optics & Control*, 2013, 20(2): 41-45.  
张雪, 梁晓庚. 红外探测器发展需求[J]. *电光与控制*, 2013, 20(2): 41-45.
- [3] Han Y G, Xuan Y M. 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] Zhang Y N, Zhang H C, Ma R, et al. Evaluation of infrared thermal imaging system detection distance in different cloud and rain conditions[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(2): 288-296.  
张亦宁, 张昊春, 马锐, 等. 不同云雨条件下红外热成像系统作用距离评估[J]. *应用光学*, 2016, 37(2): 288-296.
- [5] Wang T, Xu J, Gao Y, et al. Analysis on attenuation characteristics of infrared radiation transmitting in fog[J]. *Electronics Optics & Control*, 2019, 26(3): 65-68.  
王婷, 徐军, 高旻, 等. 雾中红外辐射传输衰减特性分析[J]. *电光与控制*, 2019, 26(3): 65-68.
- [6] Qi L L, Ji W, Bai J, et al. Analysis of influence of atmosphere on the 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.
- [7] Zhang F, Qi L L, Ji W, et al. Influence of atmosphere in different areas on middle-far infrared radiation transmission[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0401002.  
张芳, 齐琳琳, 吉薇, 等. 不同地域大气对中远红外辐射传输的影响[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0401002.
- [8] Kou R K, Wang H Y, Wu X M. Atmospheric transmittance at infrared band in low latitude areas[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 010102.  
寇人可, 王海晏, 吴学铭. 低纬度地区红外波段大气透射率研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 010102.
- [9] Rao R Z, Qiao Y L, Wei H L, 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.
- [10] Huang Y S, Song J B. Comparison of air-sea heat fluxes calculated from national centers for environmental prediction (NCEP) reanalysis data and moored buoy measurement data[J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(12): 113-120.  
黄艳松, 宋金宝. NCEP再分析资料和浮标观测资料计算海气热通量的比较[J]. *海洋科学*, 2011, 35(12): 113-120.

- 113-120.
- [11] Wei H L, Dai C M, Tang C L, et al. Atmospheric parameter model and its application in the calculation of atmospheric radiative transfer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(12): 11-18.  
魏合理, 戴聪明, 唐朝礼, 等. 大气参数模式及其在辐射大气传输计算中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(12): 11-18.
- [12] Lu C, Liu W Q, Wang Y F, et al. Simulation and analysis of sky background radiance in slant visibility calculation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1401001.  
陆川, 刘文清, 王玉峰, 等. 斜程能见度计算中的天空背景辐射亮度仿真与分析[J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1401001.
- [13] Fan W, Chen K, Ling X F, et al. Atmospheric optical characteristics of national climate observation in Shouxian County in winter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 050101.  
范伟, 陈凯, 凌新峰, 等. 寿县国家气候观测台的冬季大气光学特征[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 050101.
- [14] Ma X M, Tao Z M, Shan H H, et al. Statistical distribution of extinction coefficients of tropospheric aerosols detected by lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1101003.  
麻晓敏, 陶宗明, 单会会, 等. 激光雷达探测对流层气溶胶消光系数的统计分布[J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1101003.
- [15] Li F. Analysis of atmospheric transmission impact on mid-wave and long-wave infrared radiation[J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(4): 311-316.  
李飞. 大气传输对中长波红外辐射衰减分析[J]. *红外技术*, 2019, 41(4): 311-316.
- [16] Qi L L, Wang H B, Meng X H, et al. Analysis of the connection between frequency of occurrence of clouds and SST in southeast and South China seas [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2018, 34(6): 745-754.  
齐琳琳, 王洪兵, 孟旭航, 等. 我国东南海域云出现概率和海表温度的关系分析[J]. *热带气象学报*, 2018, 34(6): 745-754.
- [17] Wang Y, Fan W, Chen X H, et al. Effect of cloud on the target-background contrast[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(3): 281-286, 291.  
王毅, 范伟, 陈秀红, 等. 云的光学特性对目标-背景对比度的影响分析[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(3): 281-286, 291.