

水雾中 1.06 μm 激光辐射的衰减特性

袁 辉,郝明磊,李凡显,史倩义

(北京航空气象研究所,北京 100085)

摘 要: 通过试验研究了 1.06 μm 激光辐射在水雾环境中的衰减特性。定量测量了不同气象光学视程(MOR)的水雾对 1.06 μm 激光辐射的衰减程度,计算了水雾环境下的 1.06 μm 激光辐射的等效“MOR”。分别采用试验数据和经验公式计算了 1.06 μm 激光辐射在不同能见度条件下的消光系数。通过对比发现由经验公式计算的消光系数存在明显偏差,尤其是在低能见度条件下。基于试验数据,推导了一种以可见光能见度为输入的消光系数计算公式,对估计云雾环境下近红外光辐射的衰减特性具有重要参考价值。

关键词: 衰减特性; 消光系数; 1.06 μm 激光; 气象光学视程

中图分类号: P404;TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1006003

Attenuation properties of 1.06 μm laser radiation in water fog

Yuan Hui, Hao Minglei, Li Fanxian, Shi Qianyi

(Beijing Institute of Aviation Meteorology, Beijing 100085, China)

Abstract: The attenuation property of 1.06 μm laser radiation in water fog was investigated experimentally. The attenuation of 1.06 μm laser radiation in water fog was measured at different meteorological optical range(MOR). Based on experimental data, the equivalent "MOR" of 1.06 μm laser radiation was calculated. The extinction coefficient of 1.06 μm laser radiation in water fog at different MOR was calculated based on empirical equation and experiment data, respectively. The comparison of the result shows the empirical extinction coefficient has significant deviation with experiment result, especially at low MOR. A new equation was derived for calculating the extinction coefficient of 1.06 μm laser radiation in water fog based on MOR value, which is of great importance in evaluating the attenuation properties of near infrared laser radiation in water fog.

Key words: attenuation property; extinction coefficient; 1.06 μm laser; meteorological optical range

收稿日期:2018-05-13; 修订日期:2018-06-17

作者简介:袁辉(1987-),男,工程师,博士,主要从事航空大气光学测试与评估、激光探测技术方面的研究。Email: yuanhuijd@163.com

0 引言

1.06 μm 位于可见光-近红外波段的大气窗口,是近红外波段最常见的激光波长之一,各种基于 1.06 μm 激光器的激光测量、探测设备被广泛应用于激光测距、自由空间激光通信、激光雷达、激光制导、激光武器等军事、民用领域。然而,激光束在传输过程中与大气气溶胶的相互作用,会导致激光能量衰减、偏转、光束发散、抖动、闪烁和相干性变差等一系列效应^[1]。在云雾环境下,构成云雾的气溶胶粒子对近红外激光辐射强烈的吸收和散射,使激光能量随传输距离快速衰减,严重限制了相关激光探测、测量设备的作用距离和探测效果^[2]。

水雾是云雾的主要组成成分,其滴谱分布与自然云雾相近,且与自然云雾有着近似的宏观光学特性。因此,研究水雾对 1.06 μm 激光的衰减特性对研究自然云雾对 1.06 μm 激光的衰减特性具有重要参考价值。

理论上,只要知道云雾气溶胶粒子的构成和滴谱分布,其对激光辐射的衰减就可通过散射理论求解。但实际上理论求解激光大气衰减存在困难,一方面实际大气环境复杂多变,难以及时准确获得其滴谱分布,另一方面散射理论计算复杂,对实际大气环境适用性差。因此,长久以来,人们希望建立起激光辐射大气衰减与可见光能见度等常规气象参量之间的联系^[3]。Kruse、Kim、Nebuloni 等多位研究者也提出或改进了大气消光系数经验模型^[4]。但是这些模型大多来自对离散的观测数据的总结或纯理论的推导,没有经过充分的观测数据或试验验证,对于特定的波长,实际应用中常出现与实际情况不符的结果。文中研究结合大气环境试验舱设计了一种定量测量水雾对 1.06 μm 激光辐射衰减特性的试验,通过定量测试 1.06 μm 激光辐射穿过不同气象光学视程(MOR)的水雾后的衰减情况,计算不同 MOR 条件下水雾对 1.06 μm 激光辐射的消光系数,探索云雾对 1.06 μm 激光辐射传输的影响规律,建立水雾环境中 1.06 μm 激光辐射消光系数与 MOR 的关系。

1 理论基础

激光在云雾环境中传输的衰减通常可用 Beer-

Lambert 定律描述为:

$$I(R)=I_0 \exp \left[- \int_0^R \sigma(r, \lambda) dr \right] \quad (1)$$

式中: $I(R)$ 为波长为 λ 的激光在大气中传输 R 距离后的光强; I_0 为发射光强; $\sigma(r, \lambda)$ 为距离 r 处的大气消光系数(km^{-1})。

对于气溶胶分布均匀的大气,其消光系数可表示为:

$$\sigma(\lambda)=\kappa_a(\lambda)+\kappa_s(\lambda)+\sigma_a(\lambda)+\sigma_s(\lambda) \quad (2)$$

式中: $\kappa_s(\lambda)$ 和 $\kappa_a(\lambda)$ 分别表示分子散射系数和吸收系数; $\sigma_s(\lambda)$ 和 $\sigma_a(\lambda)$ 分别表示气溶胶的散射和吸收系数。

对于 1.06 μm 的激光波长,大气中的水汽、二氧化碳、氮气、臭氧等主要分子的吸收很小,根据标准大气模型大气分子吸收系数小于 10^{-6} km^{-1} ^[5]。大气分子对激光的散射主要为瑞利散射,散射强度与波长的四次方成反比,当波长大于 0.8 μm 时,大气分子瑞利散射损耗也可忽略不计^[6]。因此,水雾环境下引起激光能量衰减的主要因素是水雾气溶胶的吸收和散射,而这其中散射因素又占主导作用^[7]。

雾滴主要有悬浮在空气中的小水滴构成,自然雾滴的尺度一般在 1~100 μm 之间^[8]。理论上,只要知道水雾的滴谱分布和折射率,水雾对 1.06 μm 激光的衰减就可通过 Mie 散射理论得到比较准确的求解^[9-10]。

实际中,由于自然云雾的滴谱分布随时间、季节、地域、环境等因素变化,很难得到其准确的滴谱分布,同时基于电磁理论的 Mie 散射衰减系数求解计算过程也比较复杂,常常采用激光消光系数与 MOR 和波长的经验公式估算水雾的消光系数。

最常用的经验公式是 Kruse 于 1962 年提出的,它将消光系数与能见度联系了起来^[11-13]:

$$\sigma_\lambda = \frac{3.912}{V} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q} \quad (3)$$

式中: V 为能见度; λ 为波长(μm); q 的取值和 MOR 相关。

$$q = \begin{cases} 1.6 & V > 50 \text{ km} \\ 1.3 & 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0.585 V^{1/3} & V < 6 \text{ km} \end{cases} \quad (4)$$

需要注意的是,公式(4)中的能见度 V 在定义上与目前国际气象组织约定的能见度(MOR,气象光学视程)不一致,两者的关系为 $V=1.306 \text{ MOR}$ 。MOR 是指由白炽灯发出的色温为 2 700 K 的平行光束的

光通量在大气中削弱至初始值的 5% 所通过的路径长度, 它是标准人眼视觉曲线峰值响应的 0.55 μm (绿光) 作为参考中心波长的, 因此可把 MOR 所对应的消光系数看作 0.55 μm 光辐射的消光系数。

根据 MOR 的定义, 0.55 μm 可见光的消光系数与能见度的关系可表示为:

$$\sigma_{0.55} = -\frac{\ln(0.05)}{\text{MOR}} \approx \frac{2.996}{\text{MOR}} \quad (5)$$

对于长度为 l 的透射基线, 对应于 0.55 μm 光辐射的透过率 T_v 可表示为:

$$T_v = e^{-\sigma_{0.55} \cdot l} = e^{-\frac{2.996}{\text{MOR}} \cdot l} \quad (6)$$

对于 1.06 μm 的激光辐射, 其消光系数可通过经验公式(3)估算。

为了对比, 文中还利用消光系数的概念, 通过公式(7)计算 1.06 μm 光辐射的消光系数。

$$\sigma_m = -\frac{\ln(T_i)}{l} \quad (7)$$

式中: T_i 为通过长度为 l 的水雾区域对 1.06 μm 激光辐射的透过率。

2 试验条件简介

2.1 大气环境试验舱

试验在大气环境试验舱内进行, 试验舱长 10 m、宽 2 m、高 2.5 m, 可以完成超声波造雾、高压雾化造雾, 能产生均匀、稳定的模拟云雾环境。配置了雾滴谱仪、能见度仪、温度、湿度、气压等测量设备, 模拟云雾的滴谱分布、MOR、温度、湿度、气压等特征指标可以量化并实时监测。试验采用高压雾化和超声波组合造雾, 产生水雾环境, 水雾滴谱分布 10~80 μm 之间, 如图 1 所示。

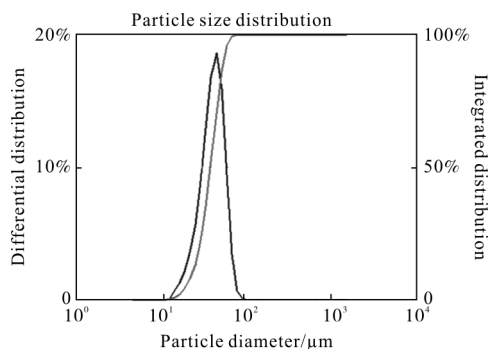


图 1 水雾滴谱分布图

Fig.1 Droplet size distribution of water fog

2.2 激光辐射源

采用高稳定度的半导体近红外激光器作为光源, 主要技术指标如表 1 所示。

表 1 试验用激光源参数

Tab.1 Parameters of the laser source in use

Parameter	Value
Wavelength/μm	1.064
Output power/mW	7.1
Angle of divergence/mrad	1.5
Power stability	<0.5%/h@25℃
Polarization ratio	>200:1

2.3 测量设备

2.3.1 Newport 2936-R 型多功能光表

采用 Newport 2936-R 型多功能光表测量激光辐射功率, 采用 918D-SL 功率探头, 在光辐射波长 0.4~1.1 μm 范围内, 测量精确度小于 ±0.2%, 最小分辨率为全量程的 0.000 4%。

2.3.2 PWD20 型能见度仪

PWD20 型能见度仪是芬兰维萨拉公司产品, 采用前向散射体制, 此型号能见度仪在国内外广泛使用, 安装在大气环境试验舱内, 主要技术指标如下:

探测范围 10~20 000 m。

探测精度 10~10 000 m, ±10%; 10~20 km, ±15%。

3 试验内容

3.1 基准值测量

将舱内能见度调整至 20 km 以上, 开启激光辐射源, 打开多功能光表, 连续测量 1.06 μm 激光器发射激光的功率, 待连续 10 min 内激光辐射功率变化小于 1%, 认为激光器充分预热, 工作在稳功率状态。此时的测量值激光辐射功率为 7.068 mW, 可认为不受云雾的影响, 作为标准值。

3.2 激光衰减量测试

采用高压雾化、超声波组合造雾方式将舱内能见度降至 10 m 以下, 形成浓雾, 保持试验舱内温度基本恒定, 昼夜温度变化处于 (25±1)℃。同时保持舱内光照条件基本稳定。经过约 20 min 的动态期, 舱内状态基本稳定, 水云雾滴谱分布介于 5~70 μm 之

间,并可在较长时间稳定悬浮,通过自然扩散和主动排风等手段逐步升高舱内能见度,对透射的激光功率进行连续测量。同时,通过经标定的 PWD20 能见度仪连续监测试验舱内能见度变化。试验测试原理图见图 2,部分测量数据如表 2 所示。图 3 为光表接收激光功率随舱内能见度的变化曲线,为了便于观察,X-轴采用了取对数坐标。

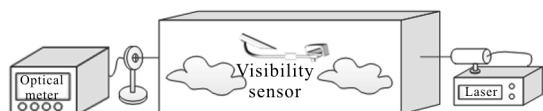


图 2 试验测试原理图

Fig.2 Schematic diagram of experiment test

表 2 辐射功率及 MOR 的测量值

Tab.2 Measured radiation power and MOR

MOR/m	Measured value/mW	Reference value/mW
20	4.703	7.068
50	6.012	7.068
100	6.470	7.068
150	6.658	7.068
200	6.791	7.068
300	6.878	7.068
500	6.950	7.068
800	6.994	7.068
1200	7.016	7.068
1800	7.032	7.068
2500	7.041	7.068

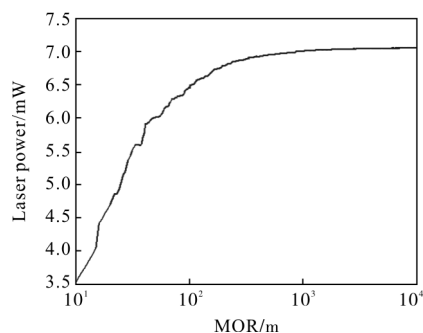


图 3 激光功率随舱内 MOR 的变化曲线

Fig.3 Laser power varies with MOR in the test cabin

能见度,利用公式(6)计算可见光透过率。

通过多功能光表实时测量 1.06μm 激光辐射的透过功率,并由公式(8)计算其透过率。

$$T_i = \frac{I_i}{I_0} \quad (8)$$

式中: I_0 为未受云雾影响时的辐射强度; I_i 为受云雾影响条件下的辐射强度。

利用公式(7)求取水雾对光辐射的消光系数的测量值。

0.55 μm 光辐射和 1.06 μm 激光辐射消光系数的经验值由公式(3)求取。

为了便于理解,采用对比的方法分析数据,按照 MOR 的概念,参照公式(5),通过下式计算了 1.06 μm 激光辐射等效的“MOR”。

$$MOR \approx \frac{2.996I_i}{\ln(T_i)} \quad (9)$$

根据测量值,计算得到了的 0.55 μm 光辐射和 1.06 μm 激光辐射透过率、以及 0.55 μm 光辐射和 1.06 μm 激光辐射消光系数的经验值、以及 1.06 μm 激光辐射消光系数的测量值。图 4~6 分别是 1.06 μm 激光辐射透过率、“MOR”和消光系数对比图。为了

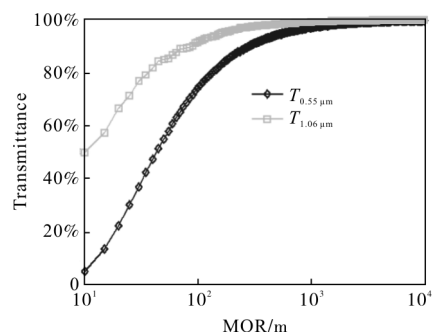


图 4 透过率随 MOR 的变化曲线

Fig.4 Transmittance varies with MOR

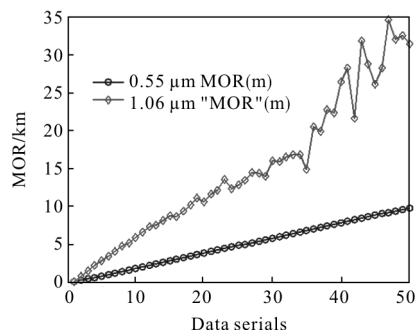


图 5 “MOR”与 MOR 对比图

Fig.5 Equivalent "MOR" and MOR

3.3 数据分析计算

试验中,通过 PWD20 能见度仪连续监测试验舱内

表 3 0.55 μm 和 1.06 μm 消光系数和透过率的计算值

Tab.3 Calculated extinction coefficient and transmittance of 0.55 μm and 1.06 μm radiation

MOR/m	0.55 μm transmittance	0.55 μm extinction coefficient/m ⁻¹	1.06 μm transmittance	1.06 μm "MOR"/m	1.06 μm extinction coefficient/m ⁻¹	1.06-0.55 μm extinction coefficient ratio	MOR ratio
20	22.36%	14.98%	66.54%	74	4.07%	0.27	3.68
50	54.93%	5.99%	85.06%	185	1.62%	0.27	3.70
100	74.11%	3.00%	91.54%	339	0.88%	0.30	3.39
150	81.89%	2.00%	94.20%	501	0.60%	0.30	3.34
200	86.09%	1.50%	96.08%	749	0.40%	0.27	3.75
300	90.50%	1.00%	97.31%	1 099	0.27%	0.27	3.66
500	94.18%	0.60%	98.33%	1 780	0.17%	0.28	3.56
800	96.32%	0.37%	98.95%	2 847	0.11%	0.28	3.56
1 200	97.53%	0.25%	99.26%	4 057	0.07%	0.30	3.38
1 800	98.35%	0.17%	99.49%	5 867	0.05%	0.31	3.26
2 500	98.81%	0.12%	99.62%	7 828	0.04%	0.32	3.13

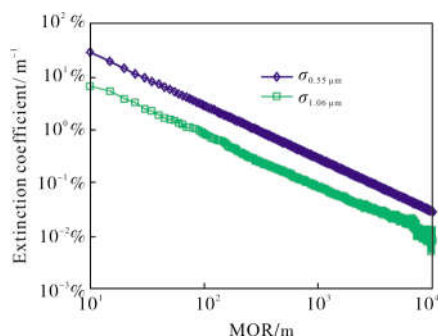


图 6 测量的 0.55 μm 和 1.06 μm 的消光系数

Fig.6 Measured extinction coefficient of 0.55 μm and 1.06 μm

便于观察,图 2 的 X-轴采用了对数坐标,图 6 采用了双对数坐标。测量和计算结果如表 3 所示,从图、表中可以看出:

(1) 1.06 μm(近红外)在云雾中的穿透能力强于 0.55 μm 光波的穿透能力。

(2) 在双对数曲线中,1.06 μm 和 0.55 μm 消光系数与能见度的关系近似为两条平行线,说明至少在该能见度区间内,水雾中两种波长的消光系数存在相对固定的线性关系;

(3) 同等能见度条件下,1.06 μm 的消光系数始终小于 0.55 μm 的消光系数,二者的比值约为 0.3;

(4) 按等效“MOR”表示,至少在大气能见度 ≤ 10 km 的范围内,水雾环境下 1.06 μm 激光辐射

的等效“MOR”在可见光的三四倍之间。

3.4 测量值与经验公式计算值的比较

表 4 是 1.06 μm 激光消光系数经验值和理论值对比表,对比曲线如图 7 所示。

表 4 1.06 μm 激光辐射消光系数经验值和试验值的对比

Tab.4 Comparison of experimental and empirical extinction coefficient of 1.06 μm laser

MOR/m	$\sigma_{0.55}/m^{-1}$	$\sigma_{1.06-empirical}/m^{-1}$	$\sigma_{1.06-measured}/m^{-1}$	$\sigma_{1.06-measured}/\sigma_{1.06-empirical}$
20	14.980%	13.370%	4.074%	0.30
50	5.992%	5.135%	1.618%	0.32
100	2.996%	2.467%	0.884%	0.36
150	1.997%	1.599%	0.598%	0.37
200	1.498%	1.173%	0.400%	0.34
300	0.999%	0.754%	0.272%	0.36
500	0.599%	0.430%	0.168%	0.39
800	0.375%	0.254%	0.105%	0.41
1 200	0.250%	0.160%	0.074%	0.46
1 800	0.166%	0.100%	0.051%	0.51
2 500	0.120%	0.068%	0.038%	0.56

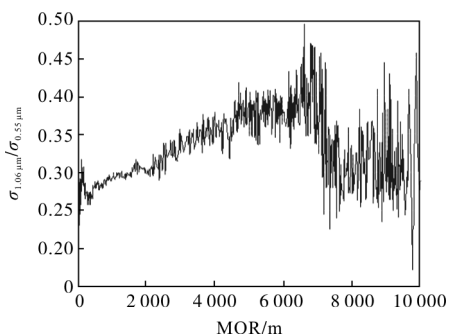


图 7 1.06 μm 和 0.55 μm 光辐射消光系数比

Fig.7 Extinction coefficient ratio of 0.55 μm to 1.06 μm radiation

图 8 表明了实测 1.06 μm 激光辐射消光系数值与经验公式计算值的对比情况。从图中可以看出,虽然经验公式在较高能见度下对 1.06 μm 的消光系数有一定估算能力,但整体上与实测数据偏差较大。原有的经验模型是基于在一定地区的观测数据推导而来的,可能受到观测地气溶胶分布的影响,且自然环境中云雾的重复性和一致性远不及试验室条件,因此该试验的结果更为可信。

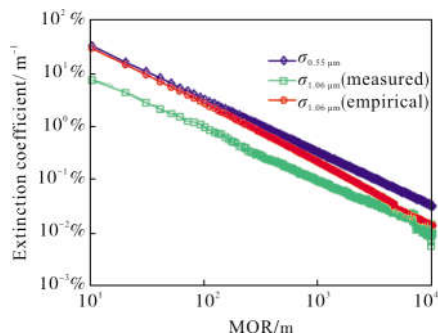


图 8 消光系数测量值与经验值

Fig.8 Measured and empirical extinction coefficient

通过对试验结果进行曲线拟合,可以得到云雾环境下可见光能见度同 1.06 μm 光波消光系数之间的关系,如图 9 和公式(10)所示。

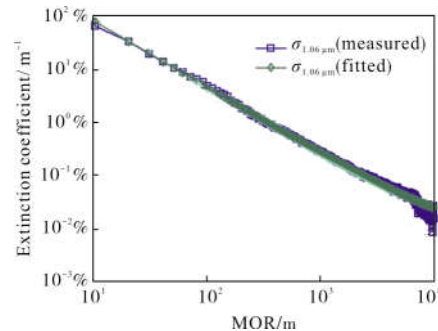


图 9 1.06 μm 消光系数和 MOR 的关系拟合曲线

Fig.9 Fitted curve of 1.06 μm extinction coefficient to MOR

$$\sigma_{1.06} = \frac{\ln(0.05)}{\text{MOR} \cdot 3.7} + 4 \times 10^{-5} \quad \text{MOR} \leq 10\ 000\ \text{m} \quad (10)$$

4 结论

通过开展水雾环境对 1.06 μm 激光辐射衰减特性试验,可以得出以下结论:水雾对 1.06 μm 激光辐射的消光系数小于对 0.55 μm 光辐射的消光系数。按照 MOR 的概念,同样以水雾为主的云雾条件下,1.06 μm 激光辐射的“MOR”要比 MOR 大三四倍左右;通过测量值、计算值与消光系数经验公式计算值的比较,证明了经验公式对消光系数的估算存在较大偏差;依据试验数据导出了新的适用于云雾环境 1.06 μm 光辐射的消光系数计算模型。

由于试验舱基线长度和光源功率稳定性等客观条件的制约,在高能见度区域,试验数据出现一定波动,经验关系对于更高能见度情况的适用性还需进一步试验验证。文中的研究仅适用于以水雾为主的云雾环境下 1.06 μm 近红外光和可见光能见度的关系,对于其他类型的气溶胶,如烟尘、盐雾、沙尘等条件,1.06 μm 消光系数与可见光能见度的关系还需进一步研究。

参考文献:

- [1] Ma Chunlin. Study of influences of atmospheric transmission characteristics on performances for laser detection[D]. Xi'an: Xidian University, 2008. (in Chinese)
马春林. 大气传输特性对激光探测性能影响研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [2] Geng Rui, Chen Fangfang, Lv Yong. Research on influencing factors of transmittance for laser transmission in atmosphere [J]. *Laser Journal*, 2016, 37(12): 13-17. (in Chinese)
耿蕊, 陈芳芳, 吕勇. 激光大气传输透过率影响因素研究 [J]. 激光杂志, 2016, 37(12): 13-17.
- [3] Rao Ruizhong. Modern Atmospheric Optics [M]. Beijing: Science Press, 2016: 313-321. (in Chinese)
饶瑞中. 现代大气光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2016: 313-321.
- [4] Nebuloni R. Empirical relationships between extinction coefficient and visibility in fog [J]. *Appl Opt*, 2005, 44(18): 3795-3804.
- [5] Gan Xinji, Guo Jin, Wang Bing, et al. Attenuation prediction

- for 1.06 μm laser propagation in the troposphere[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 29 (2): 8–13. (in Chinese).
- 甘新基, 郭劲, 王兵, 等. 1.06 μm 激光在对流层传输中的衰减预测[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2006, 29 (2): 8–13.
- [6] Yang Ruike, Ma Chunlin, Han Xiang'e, et al. Study of the attenuation characteristics of laser propagation in the atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36 (S2): 415–418. (in Chinese)
- 杨瑞科, 马春林, 韩香娥, 等. 激光在大气中传输衰减特性研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S2): 415–418.
- [7] Liu Kexiang, Xu Rongguo, Yang Ruike. Research on the attenuation characteristics of fog on the near-surface laser propagation [C]//Proceedings of the Conference on Wireless Technology in the Three Sides of the Taiwan Straits, 2005. (in Chinese)
- 刘科祥, 许荣国, 杨瑞科. 雾对近地面激光传播衰减特性的研究[C]// 海峡两岸三地无线科技学术会论文集, 2005.
- [8] Zou Jinshang, Liu Changsheng, Liu Wenbao. The Foundation of Atmospheric Physics [M]. Beijing: Meteorological Press, 1982: 95–238. (in Chinese)
- 邹进上, 刘长盛, 刘文保. 大气物理基础[M]. 北京: 气象出版社, 1982: 95–238.
- [9] Ma Jinji, Chen Jin. Using the Mie theory to calculate aerosol optical characterization [J]. *J At Mol Phys*, 2005, 22 (4): 701–707. (in Chinese)
- 麻金继, 陈瑾. 用 Mie 散射理论计算大气气溶胶光学特性[J]. 原子与分子物理学报, 2005, 22(4): 701–707.
- [10] Du H. Mie-scattering calculation [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(9): 1951.
- [11] Kruse P W, Mcglauchlin L D, Mcquistan R B. Elements of Infrared Technology: Generation, Transmission and Detection [M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1962.
- [12] Dai Yongjiang. Principle of Lidar [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 31–48. (in Chinese)
- 戴永江. 激光雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 31–48.
- [13] Chen Huangfei, Chen Yong, Li Yiyong, et al. Simulation of atmospheric transmission characteristics of laser at 1.06 μm [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(2): 266–269. (in Chinese)
- 陈煌飞, 陈勇, 李怡勇, 等. 1.06 μm 激光的大气传输仿真研究[J]. 激光技术, 2014, 38(2): 266–269.