

激光大气传输特性仿真及对激光测距的影响

赵少卿 张 雏

(军械工程学院电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要 为了研究 1.54 μm 与 1.06 μm 两种激光的大气传输特性以及对脉冲激光测距机的影响, 利用 Modtran 大气辐射传输软件进行仿真计算, 得到了 1.54 μm 与 1.06 μm 激光在大气分子、气溶胶和雾中的大气透射率; 并且通过激光测距原理得到了脉冲激光测距机最大测程与激光大气透射率的关系。研究结果表明: 大气分子对 1.54 μm 与 1.06 μm 激光的衰减基本可以忽略不计; 气溶胶对 1.06 μm 激光的衰减要强于 1.54 μm 激光, 湿度是影响两种激光透射率差异的关键因素; 两种激光在雾天的透射率基本一致, 都非常低。能见度的降低会严重影响脉冲激光测距机的最大测程。由于 1.54 μm 激光较 1.06 μm 激光有更高的大气透射率, 因此利用 1.54 μm 激光的脉冲激光测距机在最大测程方面更具优势。

关键词 大气光学; 1.54 μm 激光; 1.06 μm 激光; 大气透射率; 最大测程

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.110101

Simulation on Atmospheric Transmission Characteristic of Laser and Its Impact on Laser Ranging

Zhao Shaoqing Zhang Chu

(Department of Electronic and Optics Engineering Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)

Abstract In order to study the atmospheric transmission characteristic of 1.54 μm and 1.06 μm lasers and the impact on laser ranging, Modtran is used to simulate the atmospheric transmittance of 1.54 μm and 1.06 μm lasers in different conditions which include atmospheric molecules, aerosol and fog. The laser ranging principle is used to get the relationship between the maximum range of pulse laser rangefinder and atmospheric transmittance. The results point out that, the impact of atmospheric molecules is negligible. Decrement of aerosols to 1.06 μm laser is heavier than that to 1.54 μm laser, and humidity is the key factor. Fog has very heavy decrement to both of the lasers, and they have almost the same atmospheric transmittance in fog. The reduction of visibility has heavy impact to the maximum range of pulse laser rangefinder. Since 1.54 μm laser has better atmospheric transmittance than 1.06 μm laser, pulse laser rangefinder which uses 1.54 μm laser has advantage in the aspect of maximum range.

Key words atmospheric optics; 1.54 μm laser; 1.06 μm laser; atmospheric transmittance; maximum range

OCIS codes 010.1209; 010.1300; 010.1310; 010.1320; 010.1350

1 引 言

激光出现后即得到了广泛的应用, 其中, 脉冲激光测距机是激光应用的一个成功典范。脉冲激光测距机由于其方向性好、测距精度高、测程远、抗干扰能力强等优点, 已经成为现代距离探测的重要技术^[1-2]。

任何激光测距系统都避免不了激光在大气中的传输, 因而大气对激光测距系统的性能有着重要的影响, 而且不同波长的激光在不同条件下的传输特性也有着较大的不同^[3-7]。基于测距系统所用激光的波长, 具有针对性地对激光测距系统的器件进行设计和改进, 对于提高测程和降低成本都有着重要的意义。

近年来, 1.54 μm 波长激光在脉冲激光测距机中得到了广泛的应用, 其相对于 1.06 μm 激光来说具有人眼安全、大气穿透能力强等优点^[8-9]。但目前针对两类激光大气传输特性具体的对比研究还较为缺乏。因

收稿日期: 2013-05-22; **收到修改稿日期**: 2013-07-08; **网络出版日期**: 2013-10-14

作者简介: 赵少卿(1989—), 男, 硕士研究生。主要从事光电仪器理论及应用方面的研究。E-mail: 447653960@qq.com

导师简介: 张 雏(1964—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事激光测距技术应用与检测等方面的研究。

E-mail: zhangchu625@sina.com

此,本文以 $1.54 \mu\text{m}$ 和 $1.06 \mu\text{m}$ 激光作为研究对象,利用 Modtran 大气辐射传输软件对其在不同天气条件下的透射率进行仿真计算,分析不同天气条件下的透射率特点,并且得到了大气透射率与脉冲激光测距机最大测程之间的关系,比较研究了两种脉冲激光测距机在相同条件下的最大测程,为脉冲激光测距机今后的发展提供一定的参考依据。

2 大气透射率仿真计算

2.1 仿真的基本原理

激光在大气中传输时的能量衰减规律成指数衰减的形式:

$$I_z(\lambda) = I(\lambda) \exp[-\gamma(\lambda)z], \quad (1)$$

式中 $I_z(\lambda)$ 为入射到距离 z 处的光强, $I(\lambda)$ 为在入射面处的光强, z 为传输距离, $\gamma(\lambda)$ 是一个比例因子,称为消光系数,其与波长和粒子的谱分布相关。

Modtran 中的粒子谱分布函数可分为两个部分:

$$\frac{dN}{dr} = N(z, V)n(r), \quad (2)$$

式中 N 为粒子数密度, $N(z, V)$ 是与高度 z 和能见度 V 相关的系数, $n(r)$ 为粒子尺度分布的谱函数。软件中含有大量软件包,包括了各种类型的大气模型的数据资料,来模拟各种天气条件下的粒子谱分布。Modtran 计算程序中的消光系数以波长为 $0.55 \mu\text{m}$ 时在各种条件下的消光系数为基准,以 $\frac{\gamma(\lambda)}{\gamma(0.55)}$ 的形式存放于数据文件中以备调用。

在光程 z_1 至 z_2 间透射率的计算公式可表示为

$$T = \exp\left[-\int_{z_1}^{z_2} N(z, V)\gamma(\lambda)m(z)dz\right], \quad (3)$$

式中 $m(z)$ 为大气质量。

2.2 仿真结果及分析

利用 Modtran 大气辐射传输软件,计算 $1.54 \mu\text{m}$ 和 $1.06 \mu\text{m}$ 激光在不同条件下的大气透射率,分析两种激光的大气传输特性。

2.2.1 大气分子的影响

选取 Modtran 自带的六种大气模型,不考虑气溶胶及云、雨的影响,传输距离为 10 km , 计算结果如表 1 所示。

表 1 $1.54 \mu\text{m}$ 和 $1.06 \mu\text{m}$ 激光的大气透射率(单位: %)

Table 1 Atmospheric transmittance of $1.54 \mu\text{m}$ and $1.06 \mu\text{m}$ lasers (unit: %)

Model	1976 US standard	Topical	Mid-latitude summer	Mid-latitude winter	Subarctic summer	Subarctic winter
$1.54 \mu\text{m}$ laser	99.32	98.14	98.65	99.43	99.08	99.51
$1.06 \mu\text{m}$ laser	99.17	99.10	99.13	99.13	99.15	99.09

从表 1 可以看出,大气分子对两种激光的衰减都非常弱,透射率均可达到 98% 以上,可以得出,两种激光均在大气窗口处,吸收极弱,且波长与大气分子的尺度相差较大,散射作用也相当有限。因而,大气分子对 $1.54 \mu\text{m}$ 和 $1.06 \mu\text{m}$ 激光的衰减可忽略不计。

2.2.2 气溶胶的影响

气溶胶是在大气中一些悬浮的、稳定的分子团、液态或者固态的微粒,其直径在 $10^{-3} \sim 10^2 \mu\text{m}$ 之间,例如尘埃、灰尘、花粉、微生物以及云雾、冰晶和雨雪等粒子^[10]。分别对 $1.54 \mu\text{m}$ 和 $1.06 \mu\text{m}$ 激光在乡村、城市、海洋和沙漠气溶胶条件下,能见度分别为 3 km 、 13 km 和 23 km 的大气透射率进行了计算,结果如图 1 所示。

由图 1 可以看出:

1) 气溶胶对 $1.54 \mu\text{m}$ 和 $1.06 \mu\text{m}$ 激光造成的衰减均较为严重,是造成衰减的主要因素。随着能见度的降低以及传播距离的增加,两种激光的大气透射率都大幅度降低。并且不同类型的气溶胶所造成的衰减程

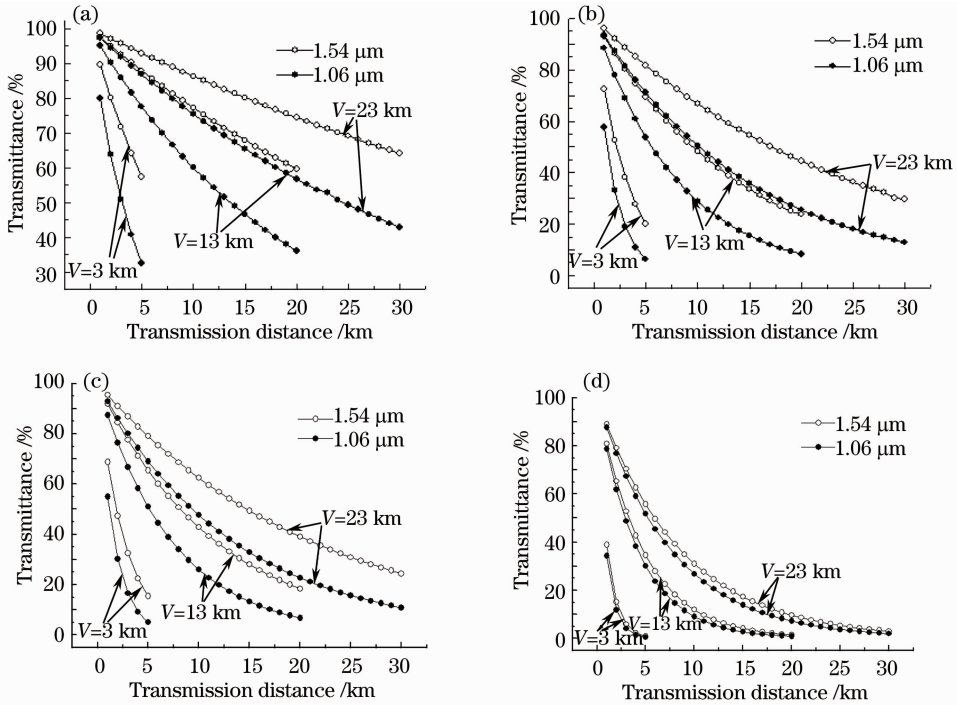


图 1 在不同类型气溶胶中 1.54 μm 和 1.06 μm 激光的大气透射率。(a)沙漠；(b)乡村；(c)城市；(d)海洋
 Fig. 1 Atmospheric transmittance of 1.54 μm and 1.06 μm laser in different aerosols of (a) desert, (b) rural, (c) urban and (d) maritime

度差别也非常明显,衰减能力依次减弱为海洋,城市,乡村,沙漠。

2) 在相同条件下,1.54 μm 激光的大气透射率普遍高于 1.06 μm 激光。在计算所选取的距离范围内,沙漠环境中,两种激光的透射率差异随传输距离的增加而增大;城市 and 乡村环境中,透射率差异在中远程较为稳定;海洋环境中,两种激光在近程和远程的透射率基本没有差异,而在中程有较小的差异。这些特点对改进激光测距机的接收放大系统有着重要的意义。

3) 沙漠环境中两种激光的大气透射率差异最为明显,而海洋环境中的大气透射率基本一致,可以得出,湿度是影响激光传输的一个重要因素,且湿度对 1.54 μm 激光的影响要强于 1.06 μm 激光。因此,在湿度较低的情况下,1.54 μm 激光的优势更加明显。

2.2.3 雾的影响

分别计算 1.54 μm 和 1.06 μm 激光在平流雾和辐射雾条件下的大气透射率,能见度为 0.8 km,计算结果如图 2 所示。

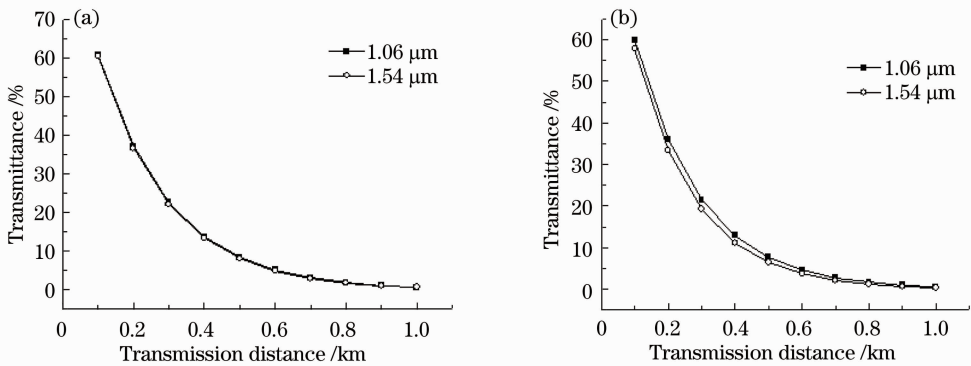


图 2 1.54 μm 和 1.06 μm 激光在雾天的大气透射率。(a)平流雾；(b)辐射雾
 Fig. 2 Atmospheric transmittance of 1.54 μm and 1.06 μm laser in foggy. (a) Advection fog; (b) radiation fog

由图 2 可以看出,无论是平流雾还是辐射雾,对激光都会造成严重的衰减。在能见度为 0.8 km 的条件下,传输距离超过 0.5 km 时透射率已不足 10%,且 1.54 μm 和 1.06 μm 激光在雾中的透射率基本一致。因此,在雾天使用激光测距机会对测程造成严重影响。

3 两种激光对激光测距的影响

3.1 激光测距原理

脉冲激光测距机一般由发射装置、接收装置、瞄准装置、终端设备、电源等部分组成,其原理框图如图 3 所示。

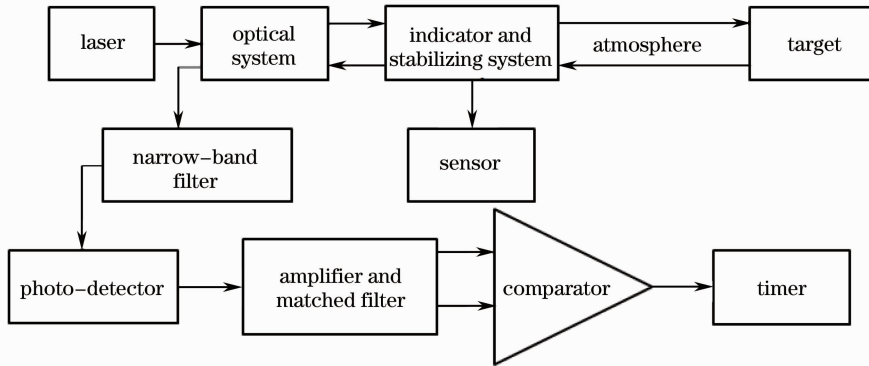


图 3 脉冲激光测距机原理图

Fig. 3 Schematic diagram of pulse laser rangefinder

其测距的基本原理为:由测距机向被测目标发射一束激光脉冲,经光学系统扩束准直,穿过大气射向目标;在激光脉冲出射时,启动计时器计时,激光射向目标后经过漫反射,一小部分激光被反射回测距机接收窗口接收,在接收到激光回波信号时终止计时,通过计算激光脉冲在发射点与目标之间传输的时间 t 可以得到目标的距离:

$$R = \frac{1}{2}ct, \quad (4)$$

式中 c 为光速。

3.2 脉冲激光测距机的测程

从脉冲激光测距机的测距原理可以看出,测距实际是对激光脉冲传输时间的测量,因而只要激光回波信号的强度高于探测器的阈值,使探测器能够响应,就可得到相应目标的距离。通过测距原理可以得到接收功率与发射功率之间的关系为

$$P_r = \frac{2P_t \tau_t \tau_r \cos \theta A_s A_r \rho \exp(-2\mu R)}{\pi^2 R^4 \theta_t^2}, \quad (5)$$

式中 P_t 为激光发射功率, P_r 为接收功率, θ_t 为激光光束的发散角, τ_t 为出射光学系统的透射率, τ_r 为接收系统的透射率, μ 为激光在大气中传输时的衰减系数, A_s 为目标面积, θ 为目标表面与入射光束的夹角, R 为被测目标距离, A_r 为接收物镜面积, ρ 为目标的漫反射率。

将(5)式改写为

$$P_r = \frac{2P_t \tau_t \tau_r A_r \cos \theta A_s \rho}{\pi^2 \theta_t^2} \cdot \frac{T^2}{R^4}, \quad (6)$$

其中 $T = \exp(-\mu R)$ 为大气透射率。(6)式中第一部分为测距机的内部参数,出厂后即确定;第二部分为目标参数,对于回波信号的大小有一定影响;第三部分为大气参数,决定了激光在大气中的衰减。当目标确定时,(6)式中的第一部分和第二部分可视为常数,则(6)式可改写为

$$P_r = C \cdot \frac{T^2}{R^4}. \quad (7)$$

将 R 移至等式左端, P_r 移至等式右端,得

$$R = C \cdot \sqrt[4]{\frac{T^2}{P_r}} \quad (8)$$

当 P_r 为探测器所能响应的最小接收功率时, R 即为最大测量距离, 也就是最大测程。由(8)式可见, 脉冲激光测距机的测程与激光脉冲的大气透射率密切相关。

3.3 测程计算结果

通过(8)式建立了脉冲激光测距机的测程与大气透射率之间的关系, 基于此, 分别计算 $1.54 \mu\text{m}$ 和 $1.06 \mu\text{m}$ 两种脉冲激光测距机在不同天气条件下的测程。大气模型选取乡村大气模型, 其他各参数选择为: $P_t = 10^6 \text{ W}$, $\tau_t = \tau_r = 0.8$, $\theta_t = 1 \text{ mrad}$, $A_r = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $\cos \theta = 1$, $A_s = 10 \text{ m}^2$, $\rho = 0.2$, $P_r = 2 \text{ nW}$ 。结果如图 4 所示。

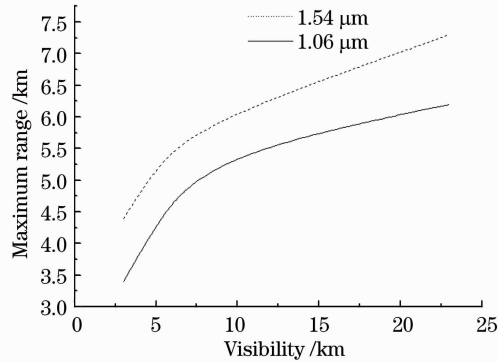


图 4 不同条件下的最大测程

Fig. 4 Maximum range in different conditions

由前面对于激光透射率的仿真计算可知, 大气的能见度在很大程度上决定了激光传输时的大气透射率, 进而决定了脉冲激光测距机的测程。由图 4 可以看出, 脉冲激光测距机的最大测程随能见度的降低而降低, 尤其在能见度 7 km 以下, 最大测程呈现加速降低的趋势。这是由于在较低能见度下, 大气的组成成分越来越复杂, 对激光传输的影响更加明显, 这种影响进一步体现在了测距机的最大测程上。

比较两种不同波长的激光可以看出, 在其他条件相同的情况下, 利用 $1.54 \mu\text{m}$ 激光作为测距激光的脉冲激光测距机的最大测程要显著高于 $1.06 \mu\text{m}$ 的脉冲激光测距机, 这正是由于 $1.54 \mu\text{m}$ 激光较 $1.06 \mu\text{m}$ 激光具有更加优良的大气穿透能力而造成的结果, 透射率高导致在相同条件下 $1.54 \mu\text{m}$ 激光的回波信号更强, 因而所能探测的距离也就更远。通过 $1.54 \mu\text{m}$ 激光在大气传输方面的优势也可以推断出, 在保证一定测程的基础之上, 对于 $1.54 \mu\text{m}$ 脉冲激光测距机来说可适当降低其激光器的发射能量, 这样既可降低激光器的成本, 又可以使得在野外依靠电池使用测距机时能够获得更长的使用时间, 这无论对于工程技术人员还是军队作战人员都具有显著的意义。

4 结 论

针对目前脉冲激光测距机所使用的 $1.54 \mu\text{m}$ 和 $1.06 \mu\text{m}$ 激光, 对比研究了两种激光在不同条件下的大气透射率, 并且通过脉冲激光测距原理得到了其最大测程与大气透射率之间的关系。研究表明: 在激光大气传输特性方面, 大气分子对两种激光传输的影响可忽略; 两种激光传输能力的区别主要在气溶胶中, $1.54 \mu\text{m}$ 激光的传输能力强于 $1.06 \mu\text{m}$ 激光, 在低湿度的条件下更为明显, 高湿度条件下两种激光的传输能力趋于一致; 雾对两种激光的衰减程度基本一致, 都非常强。在脉冲激光测距机最大测程方面, 不同天气条件对脉冲激光测距机的最大测程有显著的影响, 且在低能见度下影响更加明显; 在相同条件下, 由于 $1.54 \mu\text{m}$ 激光具有更好的大气穿透能力, 其较 $1.06 \mu\text{m}$ 脉冲激光测距机有更大的测程, 这种优势可以提高测距机的使用效率。通过以上研究, 可以为今后脉冲激光测距机的发展提供一定的依据。

参 考 文 献

- 1 Wang Qianqian, Zeng Chang'e, Peng Zhong. Integrated test technology for laser range finder [J]. High Power Laser and

- Particle Beams, 2010, 22(9): 1973–1976.
- 王茜倩, 曾嫦娥, 彭 中. 脉冲激光测距机性能综合测试技术[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(9): 1973–1976.
- 2 Wang Guchang, Sun Bin, Wan Qiang, *et al.*. A survey of military pulsed laser rangefinder technology [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2003, 1(4): 55–59.
- 王古常, 孙 斌, 万 强, 等. 军用脉冲激光测距技术与研究现状[J]. 光学与光电技术, 2003, 1(4): 55–59.
- 3 Chen Yuru, Li Qing, Liu Tingjie, *et al.*. Effect of aerosol particle character on laser attenuation coefficient [J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(7): 42–47.
- 陈玉茹, 李 晴, 刘庭杰, 等. 气溶胶粒子特性对激光衰减系数的影响[J]. 光电工程, 2011, 38(7): 42–47.
- 4 Wang Jiacheng, Qiao Yanli, Yang Shizhi, *et al.*. Study on the relation of ocean atmospheric aerosol optical model parameters [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1101005.
- 王家成, 乔延利, 杨世植, 等. 海洋大气气溶胶光学模型参数的相关性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1101005.
- 5 Wang Han, Zhang Tao. Analysis of performance for free-space optical communications with rain or fog weather condition [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(8): 080101.
- 王 涵, 张 涛. 降雨和雾天气下自由空间光通信性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(8): 080101.
- 6 Wang Jiacheng, Qiao Yanli, Yang Shizhi, *et al.*. Retrieval of polluted aerosol optical properties over coastal water [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(6): 060101.
- 王家成, 乔延利, 杨世植, 等. 近海污染大气气溶胶光学性质反演研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(6): 060101.
- 7 Liu Min, Wang Hongxing, Wang Qian, *et al.*. A revision model of the calculation of atmospheric attenuation in water fogs weather [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1005002.
- 刘 敏, 王红星, 王 倩, 等. 雨雾共存天气下大气衰减计算的修正模型[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1005002.
- 8 Lu Changyong, Wang Xiaobing, Guo Yanlong, *et al.*. Principle and evolution of 1.5x μm wavelength eye-safe military laser rangefinder [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(3): 32–35.
- 卢常勇, 王小兵, 郭延龙, 等. 1.5x μm 波长人眼安全的军用激光测距机及其进展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(3): 32–35.
- 9 Song Chao, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan. Cloud-scattering model and channel transmission characteristics analysis [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0213001.
- 宋 超, 徐智勇, 汪井源. 云散射模型与信道传输特性分析[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0213001.
- 10 Xu Yanfeng, Chen Hui, Zhang Zhijun. Study on the fractal characteristics of size distribution of atmospheric aerosols [J]. J Meteorology and Environment, 2012, 28(3): 8–14.
- 徐延峰, 陈 辉, 张志军. 大气气溶胶尺度分布分形特征研究[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(3): 8–14.