

非理想条件下气象能见度的观测方法

李 浩¹ 单陈华² 胡 帅¹ 王 毅¹

¹解放军理工大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101

²解放军第 95871 部队, 湖南 衡阳 421002

摘要 为了提高非理想条件下气象能见度的观测精度,从大气光传输理论出发,提出了等效视感阈值和广义科西米德定律,建立了非理想条件下气象能见度观测的相对误差和修正系数计算公式,并模拟分析了非黑色目标在非水平天空背景条件下的气象能见度观测的相对误差和修正系数。结果表明:修正系数受目标反射率、背景反射率、目标与背景距离以及大气消光系数的共同影响,并呈现一定的规律性分布。为了满足观测业务的需求,非理想条件下气象能见度的观测结果需要修正,特别是当修正系数小于 0.8 时。

关键词 大气光学; 气象能见度; 等效视感阈值; 广义科西米德定律; 观测误差; 修正系数

中图分类号 P412.17 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0701003

Meteorological Visibility Observation Method Under Non-Ideal Conditions

Li Hao¹ Shan Chenhua² Hu Shuai¹ Wang Yi¹

¹*Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 211101, China*

²*95871th Army of PLA, Hengyang, Hunan 421002, China*

Abstract In order to improve observation precision of the meteorological visibility under non-ideal conditions, the equivalent visual threshold and general Koschmieder's law are put forward and demonstrated based on the atmospheric optical transmission theory. Under the non-ideal condition, the observation visibility formulas of relative error and the correction coefficient are established. The weather visibility relative error and the correction coefficient of the non-black targets are analyzed under the conditions of non-parallel level of the sky background. Results show that the correction coefficient of visibility observation is influenced by target reflectivity, background reflectivity, the distance between target and background and atmospheric extinction coefficient, and the distribution of correction coefficient has a certain regularity. In order to meet the needs of visibility observation business, the results of visibility observation under non-ideal conditions need to be modified, especially when the correction coefficient is less than 0.8.

Key words atmospheric optics; meteorological visibility; equivalent visual threshold; general Koschmieder's law; observation error; correction coefficient

OCIS codes 010.7295; 010.3920; 010.1285

1 引 言

气象能见度是天气预报、环境监测、交通运输和目标侦察等领域的一项重要测量参数^[1],观测方法有目测和器测两种^[1-2],并且均依赖于黑色目标、水平天空背景和大气水平均匀等理想假设条件。但是,实际观测时,这些理想假设条件往往难以满足,从而给气象能见度的观测带来误差。对于目测而言,在非理想条件下观测非常困难,并且容易产生较大误差,因而必须对结果进行修正。对于器测而言,由于其遵循的科西米德定律在非理想条件下不成立,因此测量的气象能见度与实际能见度也不一致,在资料保障应用时必须进行转换。由此可见,非理想条件下的气象能见度的观测方法值得研究,这不仅可以直接提高目测气象能见度的精度,也可使得目测和器测结果保持一致性,并且有利于开展气象能见度的多种资料比对分析、观测新技术评

收稿日期: 2016-01-05; 收到修改稿日期: 2016-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(41575025)

作者简介: 李 浩(1973—),男,硕士,副教授,主要从事大气探测与大气遥感方面的研究。E-mail: Lihao_pla@163.com

估和各种场合下的保障应用。针对非理想条件下的气象能见度观测,已有很多的研究成果。一种方法是基于历史资料统计特定目标在特定背景条件下的气象能见度值的经验方法,比如,气象观测业务中给出了常见具体几种目标物在若干典型实际背景条件下观测时的经验修正系数^[1],这种方法不足之处在于缺少明确的理论依据,且有限的几个修正系数难以满足复杂多变的实际情况。另一种方法是基于光传输过程的大气中目标物能见度理论,考虑了几何条件和光学参数等的影响,目前这类研究主要侧重于倾斜能见度的探测方法研究^[3],尚无法直接应用于气象能见度观测业务之中。

本文从大气中光传输理论出发,建立了目标能见度基本模型,并结合气象能见度的定义,从而得到气象能见度的大气光学物理意义和数学约束条件,以此为基础研究了非黑色目标和在非水平天空背景条件下气象能见度的观测误差和修正系数的取值与分布特征,旨在为非理想条件下气象能见度的观测以及保障应用提供既有理论基础又方便实用的参考。

2 气象能见度的光学模型

对大气中目标能见度问题的研究需要将大气光学与人眼视觉相结合,气象能见度规定为在水平方向观测,其观测条件如图 1 所示。

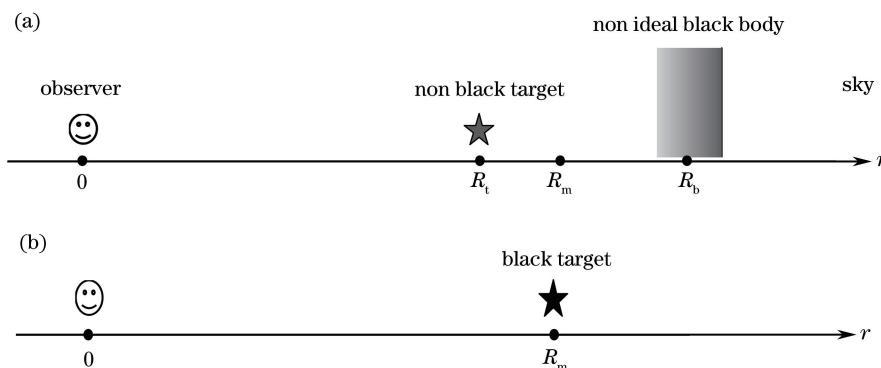


图 1 观测条件。(a) 非理想条件; (b) 理想条件

Fig. 1 Observation conditions. (a) Non-ideal condition; (b) ideal condition

设目标与观察者距离为 r ,大气吸收和一次散射引起光亮度衰减,而大气多次散射使光亮度增强,以微分和积分形式表示到达观察者的光的传输方程^[4],即

$$\begin{cases} dL(r) = -k(r) \cdot L(r) dr + k(r) \cdot J(r) dr \\ L(r) = L(0) \cdot T(r) + D(r) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $L(r)$ 为亮度, $k(r)$ 为消光系数, $J(r)$ 为大气真亮度, $L(0)$ 为原始亮度(即目标位置处的亮度), $L(r)$ 为视亮度(即到达观测者位置处的亮度), $T(r)$ 为目标和观察者之间气柱的透射率, $D(r)$ 为该气柱产生的气幕光亮度,这两个参数可表示为

$$\begin{cases} T(r) = \exp\left[-\int_0^r k(r) dr\right] \\ D(r) = \int_0^r k(r) \cdot J(r) \cdot \exp\left[-\int_0^r k(r) dr\right] dr \end{cases} \quad (2)$$

通常,大气在水平方向是均匀分布的,即水平方向上消光系数和大气真亮度均与位置无关,因此 $J(r) = J$ 、 $k(r) = k$,代入(2)式可得

$$\begin{cases} T(r) = \exp(-k \cdot r) \\ D(r) = J \cdot [1 - T(r)] \end{cases} \quad (3)$$

目标与背景的视亮度对比是决定目标是否能见的主要因素^[5]。设 $L_b(0)$ 为背景原始亮度, $L_t(0)$ 为目标原始亮度, $L_b(r)$ 为背景视亮度, $L_t(r)$ 为目标视亮度,当目标与背景的视亮度对比 $C(r)$ 与人眼视感阈值相等时为能见^[1,6],可以表示为

$$C(r) = \frac{L_b(r) - L_t(r)}{L_b(r)} = \epsilon. \quad (4)$$

设目标反射率为 η_t , 背景反射率为 η_b , 由于入射亮度为大气真亮度, 那么

$$\begin{cases} L_t(0) = J \cdot \eta_t \\ L_b(0) = J \cdot \eta_b \end{cases} \quad (5)$$

设目标和背景与观察者之间的距离分别为 R_t, R_b , 由(1)、(3)和(5)式可得背景和目标的视亮度分别为

$$\begin{cases} L_t(R_t) = J \cdot \eta_t \cdot \exp(-k \cdot R_t) + J \cdot [1 - \exp(-k \cdot R_t)] \\ L_b(R_b) = J \cdot \eta_b \cdot \exp(-k \cdot R_b) + J \cdot [1 - \exp(-k \cdot R_b)] \end{cases}, \quad (6)$$

代入(4)式, 可得

$$\epsilon = \frac{(1 - \eta_t) \cdot \exp(-k \cdot R_t) - (1 - \eta_b) \cdot \exp(-k \cdot R_b)}{1 - (1 - \eta_b) \cdot \exp(-k \cdot R_b)}. \quad (7)$$

设目标与背景距离为 $W_b = (R_b - R_t) \geq 0$, 由(7)式可得

$$R_t = -\frac{1}{k} \ln \left[\frac{\epsilon}{(1 - \eta_t) - (1 - \epsilon) \cdot (1 - \eta_b) \cdot \exp(-k \cdot W_b)} \right]. \quad (8)$$

由(8)式可知, 对能见度有影响的因素有人眼视觉特征、背景、目标和大气消光系数。为了使观测资料具有可比性, 在气象领域定义了气象能见度^[1], 是指在当时天气条件下和以水平天空为背景, 视力正常的人能够识别出大小适度的黑色目标物的最大水平距离, 即

$$R_m = R_t \Big|_{\eta_t=0, \eta_b=1, W_b=0} = \frac{-\ln \epsilon}{k} \geq R_t. \quad (9)$$

通常取 $\epsilon = 0.02$, 代入(9)式得 $R_m = \frac{3.912}{k}$, 这就是气象观测中广泛使用的科西米德定律^[1]。可见, 气象能见度既可以表示理想条件下大气能见度状况, 也可以反映大气受污染的程度^[2,4]。

3 非理想条件下气象能见度的观测

由(9)式可知, 目测气象能见度需要黑色目标和水平天空背景合作才能得到准确结果, 观测条件如图 1(b), 器测气象能见度遵循的科西米德定律也是在黑色目标和水平天空背景等理想条件下才成立, 因此, 气象能见度的观测依赖黑色目标、水平天空背景和大气水平均匀等理想条件。但是, 由于观测环境条件的限制, 实际观测气象能见度时往往面临非理想情况, 非理想观测条件如图 1(a)所示, 最普遍的情况是目标不是黑色, 背景也不是水平天空^[2]。

引入等效视感阈值, 将其定义为

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon}{(1 - \eta_t) - (1 - \epsilon) \cdot (1 - \eta_b) \cdot \exp(-k \cdot W_b)}. \quad (10)$$

显然, $\epsilon_e \Big|_{\eta_t=0, \eta_b=1, W_b=0} = \epsilon$ 。代入(8)式可得

$$R_t = \frac{-\ln \epsilon_e}{k}. \quad (11)$$

引入等效视感阈值后, 能见度与大气消光的关系、气象能见度与大气消光的关系在形式上得到统一。由于(11)式与科西米德定律形式一致^[1], 所以称为广义科西米德定律。

由(9)~(11)式可知, 将能见度作为气象能见度带来的相对误差表示为

$$\frac{\Delta R_m}{R_m} = \frac{R_m - R_t}{R_m} = \frac{\ln [(1 - \eta_t) - (1 - \epsilon) \cdot (1 - \eta_b) \cdot \exp(-k \cdot W_b)]^{-1}}{\ln \epsilon}. \quad (12)$$

由(12)式可见, 由于非黑色目标和非天空背景引起的气象能见度观测的相对误差, 与目标反射率、背景反射率、背景位置以及大气消光系数有关。下面以具体情况为例进行分析。

假设目标为非黑色, 背景为水平天空, 即 $\eta_t > 0, \eta_b = 1, W_b = 0$ 。根据(10)和(12)式计算得到的等效视感阈值和相对误差值, 如图 2 所示。从图中可以看出, 随着目标反射率的增大, 相对误差和等效视感阈值迅速增大。当目标反射率为 0.55 时, 相对误差即为 20%, 超过了气象能见度允许误差, 此时等效视感阈值为

0.04,也显著超过人眼视感阈值0.02。因此可以认为,等效视感阈值增大是相对误差增大的原因。

从上述分析可以看出,为了提高非理想条件下气象能见度的观测精度,必须对观测结果进行修正。定义修正系数为 $\zeta = \frac{R_t}{R_m}$, 则 $\frac{\Delta R_m}{R_m} = 1 - \zeta$ 。也就是说,将观测到的能见度除以修正系数,即可得到准确的气象能见度^[2]。由(8)、(10)和(11)式可得

$$\zeta = \frac{\ln \epsilon + \ln [(1 - \eta_t) - (1 - \epsilon) \cdot (1 - \eta_b) \cdot \exp(-k \cdot W_b)]^{-1}}{\ln \epsilon} \leq 1. \quad (13)$$

图2也给出了按(13)式计算得到的修正系数值。在水平天空背景的情况下,随着目标反射率的增大,修正系数迅速减小。显然,为了满足能见度观测结果修正的需要,必须提供修正系数的值。

假设目标为黑色,但背景不是水平天空,即 $\eta_t = 0, \eta_b < 1, W_b \neq 0$ 。设气象能见度为2 km,根据(13)式计算的结果如图3所示。从曲面的分布特点可以看出,随着背景反射率以及目标与背景距离的减小,修正系数也减小。特别地,当目标与背景距离越小时,修正系数随背景反射率减小的趋势越明显。若目标与背景距离为0,背景反射率小于0.45时的修正系数小于0.8;当目标与背景距离为0,且背景反射率也为0时,修正系数为0,也就是说,黑色背景中无法看到黑色目标。随着目标与背景距离的增大,修正系数随背景反射率减小的趋势越来越不显著,当目标与背景距离大于900 m后,修正系数均大于0.95,这是由于目标与背景距离越大,则相应的大气柱透射率减小,气幕光增强也就越显著,从而不同反射率的背景均融合在天空亮度中,背景视亮度接近天空亮度,这可通过(3)式和(6)式证明^[7]。

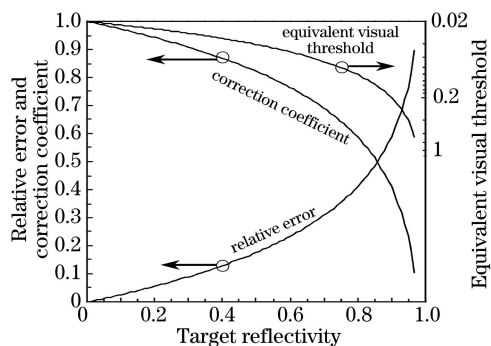


图2 目标反射率对相对误差、修正系数和等效视感阈值的影响

Fig. 2 Influence of target reflectivity on relative error, correction coefficient and equivalent visual threshold

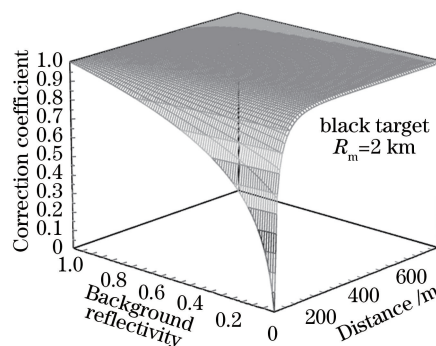


图3 背景反射率、目标与背景距离对修正系数的影响

Fig. 3 Influence of background reflectivity, distance between target and background on correction coefficient

上述分析表明,背景反射率和目标与背景的距离影响修正系数值,从(13)式可知,这种影响与大气消光系数(即气象能见度)有关。在气象观测业务中,气象能见度观测允许误差为20%^[1],因此修正系数小于0.8的情况特别值得注意。图4给出了气象能见度为2 km和10 km两种条件下,修正系数随背景反射率、目标与背景距离的变化分布,图中曲线为修正系数为0.8,曲线左下区域对应修正系数小于0.8,右上区域对应修正系数大于0.8。从图4可以看出,修正系数大于0.8的区域大小与气象能见度有关,气象能见度为2 km时明显大于10 km时,这是由于不同反射率的背景与天空融合的程度和快慢不仅与背景反射率、目标与背景距离有关,而且与大气散射系数有关。由(3)式可知,大气真亮度越大则气柱亮度也就越大,而大气真亮度与大气散射系数密切相关,一般而言,大气散射系数越大则大气真亮度也越大,从而气象能见度越差的情况下背景对能见度的影响减弱。在实际观测时,可根据图4由背景反射率、目标背景距离大致确定修正系数的区间位置,如果处于修正系数小于0.8区域,则必须进行修正。

假设非黑色目标,实际背景也不是水平天空的情况下,此时 $\eta_t > 0, \eta_b < 1, W_b \neq 0$ 。由于气象能见度针对的是亮背景中对暗目标识别问题,因此 $\eta_t \geq \eta_b$ 。设气象能见度为10 km、距离为500 m,根据(13)式计算得到的修正系数分布如图5所示。从图中可以看出,当 $\eta_t = 0, \eta_b = 1$ 时修正系数为1,随着背景反射率减小和目标反射率增大,修正系数也减小;当接近 $\eta_t = \eta_b$ 时,修正系数迅速减小为0。还可以看出,目标反射率对修正系数的影响比背景反射率要显著。目前气象观测业务中规定给出的针叶树、木建筑物和砖建筑物等不同

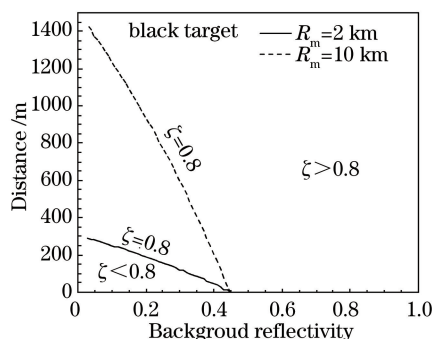


图 4 修正系数取值范围的判定

Fig. 4 Determination of range of correction coefficient

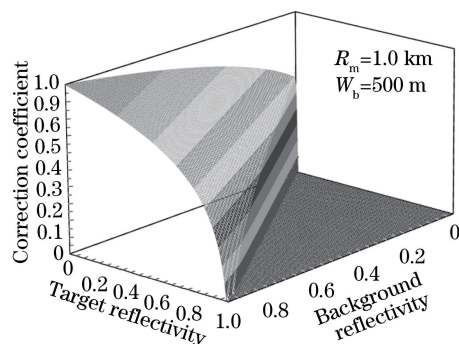


图 5 目标反射率、

背景反射率对修正系数的影响

Fig. 5 Influence of target reflectivity and background reflectivity on correction coefficient

目标在森林、沙地和有云天空等背景条件下观测时的经验修正系数的取值^[1]和本文的计算结果一致。修正系数随目标反射率和背景反射率的变化,与气象能见度和目标与背景的距离有关。类似于图 4,计算了气象能见度为 10 km,目标与背景距离为 500 m,以及气象能见度为 2 km,目标与背景距离为 1000 m 的两种情况下,修正系数取值区域的判定如图 6 所示,图中曲线表示修正系数为 0.8,曲线的右上区域表示修正系数大于 0.8,左下区域表示修正系数小于 0.8。可以看出,气象能见度越差、目标与背景距离越大,修正系数大于 0.8 的区域也越大。这是由于大气散射系数越大,且光学传输路径越长,则气柱光亮度也就越大,从而造成背景光就更容易被融合在天空背景之中,这通过(3)式也可以证明^[7]。

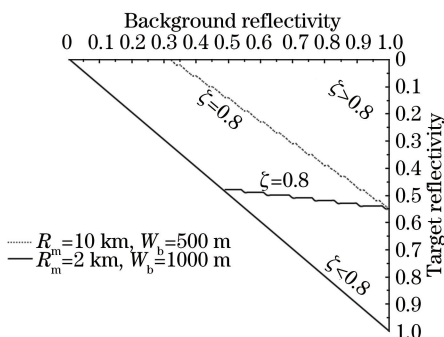


图 6 修正系数取值范围的判定

Fig. 6 Determination of range of correction coefficient

4 结 论

在气象能见度的光学模型的基础上,提出了等效视感阈值和广义科西米德定律,给出了气象能见度观测的相对误差和修正系数的计算公式,进而计算并分析了非黑色目标、非水平天空条背景件下修正系数的取值、规律和成因。研究成果可以应用于大气水平均匀情况下气象能见度目测修正,以及目测和器测结果比的分析、新器测技术评估和气象能见度资料的保障应用。

值得注意,气象能见度非理想观测条件有多种可能,除了讨论的目标和背景因素外,还包括观测路径上大气消光系数和大气真亮度的不均匀^[8]。当考虑大气光学参数不均匀性时,能见度的光学模型将更为复杂^[6]。特别地,当倾斜方向观测时,路径上大气光学参数是不均匀的,由于大气光学参数特别是大气真亮度的分布复杂且测量困难^[8],因此倾斜能见度的观测方法需要得到重视^[8-11]。事实上,即使在水平方向也存在大气光学参数不均匀的可能^[12-13]。可以理解,对于大气光学参数不均匀的情况,提出的等效视感阈值和广义科西米德定律仍有借鉴意义,其具体形式中必然包含观测路径大气光学参数不均匀性的描述因素^[13]。

需要说明,主要讨论了气象能见度观测理论模型方面的误差,实际气象能见度的观测误差来源较多,还与测量仪器的光机电等特性密切相关^[14]。另外,讨论了可见光波段光强度信息基础上的气象能见度,但大

气红外能见度也应该得到重视^[15],以及运用光的偏振信息进行目标识别也是重要的发展方向,这就使能见度理论和观测技术得到新的发展^[4,16]。

参 考 文 献

- 1 Sun Xuejin, Wang Xiaolei, Li Hao, *et al.*. Atmospheric sounding[M]. Beijing: Meteorological Press, 2009: 45-53.
孙学金, 王晓蕾, 李 浩, 等. 大气探测学[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 45-53.
- 2 Han Yong, Wang Tijian, Rao Ruizhong, *et al.*. Progress in the study of physics optics characteristics of atmospheric aerosols[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(11): 7396-7407.
韩 勇, 王体健, 饶瑞中, 等. 大气气溶胶物理光学特性研究进展[J]. 物理学报, 2008, 57(11): 7396-7407.
- 3 Wang Yi, Rao Ruizhong. Slant visibility: multi-factor analysis[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(10): 945-950.
王 毅, 饶瑞中. 空间斜程能见度的影响因素分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(10): 945-950.
- 4 Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, *et al.*. Atmospheric physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003: 450-452.
盛裴轩, 毛节奏, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 450-452.
- 5 Zhou Liwei. Target detection and recognition[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004: 134-137.
周立伟. 目标探测与识别[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 134-137.
- 6 Rao Ruizhong. Vision through atmosphere and atmospheric visibility[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2486-2492.
饶瑞中. 大气中的视觉与大气能见度[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2486-2492.
- 7 Zhou Xiuji, Tao Shanchang, Yao Keya. Advanced atmospheric physics[M]. Beijing: Meteorological Press, 1990: 750-768.
周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 高等大气物理学[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 750-768.
- 8 Rao Ruizhong. Modern atmospheric optics[M]. Beijing: Science Press, 2012: 750-768.
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 750-768.
- 9 Qiu Jinhuan. Numerical experiment on slant visibility and its calculation formula[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1987, 11(4): 404-411.
邱金桓. 机场斜视能见度的数值模拟试验及其计算公式[J]. 大气科学, 1987, 11(4): 404-411.
- 10 Yue Bin, Dong Jingjing, Sun Dongsong, *et al.*. Measuring method of atmospheric slant visibility with semiconductor lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(1): 135-139.
岳 斌, 董晶晶, 孙东松, 等. 半导体激光雷达的斜程能见度测量方法[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 135-139.
- 11 Robert S Fraser. Apparent contrast of objects on the earth's surface as seen from above the earth's atmosphere[J]. Journal of the Optical Society of America, 1964, 54(3): 289-300.
- 12 Mao Jietai, Li Jianguo. Visibility and telephotometer[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1984, 8(2): 170-177.
毛节奏, 李建国. 气象能见度与望远光度计[J]. 大气科学, 1984, 8(2): 170-177.
- 13 Li Hao, Sun Xuejin, Shan Chenhua, *et al.*. Discussions on basis theory and observation of meteorological visibility[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 14(3): 297-302.
李 浩, 孙学金, 单陈华, 等. 关于气象能见度理论与观测的讨论[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2013, 14(3): 297-302.
- 14 Li Hao, Sun Xuejin. Theoretical analysis of measurement error of forward scattering visibility meter[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(6): 1-5.
李 浩, 孙学金. 前向散射能见度仪测量误差的理论分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 1-5.
- 15 Zhang Jingwei, Wu Pengfei, Rao Ruizhong. Infrared atmospheric visibility: definition, algorithm and analysis of key factors[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1101002.
张景伟, 武鹏飞, 饶瑞中. 红外大气能见度: 定义、算法及关键因素分析[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1101002.
- 16 Sun Xuejin, Li Hao, Tang Liping. Study on atmosphere volume scattering polarization degree characteristics in visible and infrared band[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0501001.
孙学金, 李 浩, 唐丽萍. 可见光和红外波段大气体散射偏振度特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0501001.