

doi:10.3788/gzxb20154406.0601002

基于太阳光度计分层算法获取气溶胶标高

徐梦春^{1,2}, 徐青山¹, 范传宇^{1,2}, 杨亦萍^{1,2}

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所 大气成分与光学重点实验室, 合肥 230031)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

摘 要:大气气溶胶具有很强的时空变化特性, 而气溶胶标高是反映大气气溶胶垂直分布特性的一个重要参量, 常规获取大气气溶胶标高的方法需要多种仪器进行联合测量. 基于均匀平行球面大气分层的假定, 研究了利用太阳光度计的分层算法获取大气气溶胶标高的方法. 结果表明, 利用该分层算法可仅利用太阳光度计一种仪器同时获得各分层大气平均消光系数和光学厚度、气溶胶垂直分布高度、气溶胶标高等参数. 该算法所得气溶胶标高与常规方法获得的气溶胶标高进行比较, 相对误差在 10% 以内; 得到的大气总光学厚度与整层算法计算的大气总光学厚度的相对误差小于 2%. 因而, 利用该分层算法仅使用太阳光度计一种仪器来获取气溶胶标高的方法是可行的, 拓展了太阳光度计的应用.

关键词:大气光学; 太阳光度计; 分层算法; 气溶胶标高; 气溶胶垂直分布高度; 气溶胶光学厚度; 消光系数
中图分类号: P407.4; O43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2015)06-0601002-9

Aerosol Scale Height Measured by Sun-Photometer Based on Stratified Atmospheric Algorithm

XU Meng-chun^{1,2}, XU Qing-shan¹, FAN Chuan-yu^{1,2}, YANG Yi-ping^{1,2}

(1 Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation,

Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Atmospheric aerosol has a strong characteristic of temporal and spatial variation. Aerosol scale height is an important physical parameter to reflect atmospheric aerosol vertical distribution, which is often measured by several instruments simultaneously. Based on the assumption of uniform parallel sphere of stratified atmosphere, a new method that aerosol scale height is obtained only by sun-photometer is studied, using stratified atmospheric algorithm. The research indicates that the parameters such as average extinction coefficient and the optical depth of stratified atmosphere, atmospheric aerosol vertical distribution height, and aerosol scale height can be gotten by the stratified atmospheric algorithm only using sun-photometer. Compared with conventional method, the relative error of aerosol scale height gained by stratified atmospheric algorithm is less than 10%. The relative error of atmospheric optical depth gained by stratified atmospheric algorithm and whole atmospheric algorithm is less than 2%. Therefore, using stratified atmospheric algorithm to obtain aerosol scale height only by sun-photometer is feasible, and it extends the sun-photometer's application.

Key words: atmospheric optics; sun-photometer; stratified atmospheric algorithm; aerosol scale height; aerosol vertical distribution height; aerosol optical thickness; extinction coefficient

OCIS Codes: 010.1110; 010.1290; 010.0280; 280.1100; 290.2200

0 引言

在辐射传输计算与对地遥感观测中, 大都忽略了

大气气溶胶垂直分布的影响. 然而随着我国工业化和城市化进程的发展, 气体和颗粒物的排放明显增加, 使得大气气溶胶的垂直分布变化得更快速更剧烈. 为

基金项目: 气象专项课题 (No. GYHY201106002-03) 资助

第一作者: 徐梦春 (1986-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为气溶胶光学特性及卫星遥感. Email: xumengchun1234@163.com

导师 (通讯作者): 徐青山 (1965-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为大气探测、辐射传输、卫星遥感与图像大气校正. Email: qshxu@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2015-01-19; 录用日期: 2015-03-10

<http://www.photon.ac.cn>

准确地估算大气辐射不得不考虑大气气溶胶的垂直分布^[1]. 随着激光雷达技术的发展, 大气气溶胶垂直结构的观测条件已具备. 因而在现阶段的辐射传输计算研究中, 大气气溶胶的垂直分布特征研究已是一个十分活跃的课题. 其中, 气溶胶标高就是反映气溶胶垂直分布特征的一个重要物理参量.

在研究中气溶胶标高的概念不断完善. Victor N. Uzhegov 在大气气溶胶均匀分布的假定下提出气溶胶有效高度 (the “effective” height of the homogeneous aerosol atmosphere) 的概念^[2]; Koschmieder 发现在近地面层目标辐射与地面辐射的相对差随距离呈指数衰减^[3]; Jinhuan Qiu 假定整层大气气溶胶随高度指数分布, 提出气溶胶标准高度 (the “standard” height of the total column aerosol) 的概念^[4-5], 后又对其进行修正假定对流层气溶胶随高度指数分布, 更名为气溶胶标高 (the scaling height of the tropospheric aerosol), 同时他还指出实际实验中一条气溶胶消光廓线可能不是严格按照指数分布, 但其月平均/季平均/年平均一般是遵循指数分布的^[5]; 假如气溶胶随高度不遵循指数分布, 根据指数分布所计算得到的气溶胶标高就称之为等效气溶胶标高 (equivalent aerosol scale height)^[3].

通常获取气溶胶标高的方法需要测量大气气溶胶光学厚度以及近地面气溶胶消光系数, 因而至少需要两种仪器进行联合测量. 气溶胶光学厚度一般使用太阳光度计测量, 而近地面气溶胶消光系数的测量方法却多种多样. M. Calvello 等用光栅光谱仪分别测量距离观察者 7 km 和 13 km 的高山上目标物辐射量相对差, 通过两者的比值得到了近地面气溶胶消光系数^[3]. 根据 WMO(1983) 提出的地表能见度仅由大气消光系数决定^[4], Jinhuan Qiu, Man Sing Wong, 韩永等通过测量能见度得到了近地面气溶胶消光系数^[5,7-9]. Ansmann, Matthais, Spinhirne, McCormick 等相继用各种地基空基激光雷达测量气溶胶消光系数^[10-13].

基于太阳光度计测量的稳定性和可靠性, 太阳光度计在大气光学参数的探测中被广泛使用. 全球各地相继建立了多个地基自动太阳光度计观测站, 如 AERONET、Photons、AeroCan、AGSNet、Skynet、CAeroNet 等. 然而传统的太阳光度计的数据处理方法, 只能获得整层大气的光学参数, 如整层大气光学厚度、水汽含量等, 并不能得到分层大气的光学参数, 因而仅利用太阳光度计一种仪器也不能得到大气气溶胶标高. 为拓展太阳光度计的应用范围, 本文在均匀平行球面大气分层的假定下, 利用新提出的太阳光度计的分层算法反演了分层大气光学参数^[14], 并进一步研究了仅利用太阳光度计一种仪器来获取大气气溶胶标高的方法.

1 测量原理与方法

太阳光度计测量数据处理是假定大气层为均匀平行平面, 太阳光度计只能得到整层的而不能得到分层的大气光学参数. 随着天顶角的增大, 均匀平行球面假定更符合实际大气情况. 图 1 为均匀平行球面假定将大气分为两层的示意图, OP 是地球半径, PH 是大气层总垂直高度, P 是太阳光度计观测点, θ 是太阳天顶角. 第一层大气垂直厚度 PZ , 用 Z_1 表示; 第二层大气垂直厚度 ZH , 用 Z_2 表示. 太阳光线通过第一层和第二层大气的路径 PA 和 AS 分别用 $L_1(\theta)$ 和 $L_2(\theta)$ 表示.

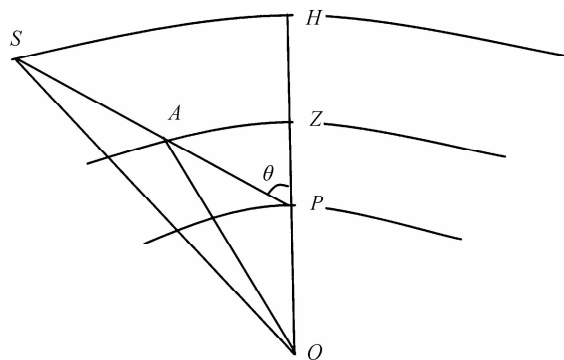


图 1 两层均匀平行球面大气假定

Fig. 1 The assumption of uniform parallel sphere of two layer atmosphere

根据两层均匀平行球面大气分层假定, 太阳光度计测量的太阳直接辐射响应电压值 V 按照 Beer-Bouguer-Lambert 定律可表示为

$$\ln \frac{V(\lambda, \theta)}{R} = -K_1(\lambda)L_1(\theta) - K_2(\lambda)L_2(\theta) + \ln V_0(\lambda) \quad (1)$$

式中 $V_0(\lambda)$ 是太阳光度计在大气层外测量时对应的仪器响应电压值; R 为日地距离修正因子; $K_1(\lambda)$ 和 $K_2(\lambda)$ 分别表示第一层和第二层大气的平均消光系数. 太阳光线通过第一层和第二层大气的路径 $L_1(\theta)$ 和 $L_2(\theta)$ 随太阳天顶角 θ 变化, 以 $\ln(V(\lambda, \theta)/R)$ 为函数, $L_1(\theta)$ 和 $L_2(\theta)$ 为自变量, $K_1(\lambda)$ 和 $K_2(\lambda)$ 为未知系数. $\ln V_0(\lambda)$ 为未知常数项, 选择多个太阳天顶角下的数据便可根据式 (1) 通过多元线性回归求得 $K_1(\lambda)$ 和 $K_2(\lambda)$. 自变量 $L_1(\theta)$ 和 $L_2(\theta)$ 可根据图 1 中的三角关系求出, 但需给定大气层总垂直高度.

$$\text{根据分层算法得到的大气总垂直光学厚度 } \tau(\lambda) \text{ 为} \quad \tau(\lambda) = \tau_1(\lambda) + \tau_2(\lambda) = K_1(\lambda)Z_1 + K_2(\lambda)Z_2 \quad (2)$$

式中 Z_1 与 Z_2 是第一层与第二层大气垂直厚度. 由于气溶胶光学厚度可通过气溶胶消光系数对高度积分而得到, 则第一层大气气溶胶光学厚度 $\tau_{a1}(\lambda)$ 还可表示为^[7-9]

$$\tau_{a1}(\lambda) = \int_0^{Z_1} \sigma_a(z, \lambda) dz \quad (3)$$

$$\sigma_a(z, \lambda) = \sigma_a(0, \lambda) \exp\left[-\frac{z}{H_a(\lambda)}\right] \quad (4)$$

$\sigma_a(z, \lambda)$ 为高度 z 处 λ 波段的气溶胶消光系数, $\sigma_a(0, \lambda)$ 为近地面层的气溶胶消光系数, $H_a(\lambda)$ 是气溶胶标高. 根据式(3)和(4)得

$$\tau_{a1}(\lambda) = \sigma_a(0, \lambda) H_a(\lambda) \left[1 - \exp\left(-\frac{Z_1}{H_a(\lambda)}\right)\right] \quad (5)$$

又整层大气气溶胶光学厚度可以表示为^[7]

$$\tau_a(\lambda) = \sigma_a(0, \lambda) H_a(\lambda) \quad (6)$$

因而由式(5)和(6)可以得到计算气溶胶标高的公式, 即

$$H_a(\lambda) = \frac{Z_1}{\ln \tau_a(\lambda) - \ln[\tau_a(\lambda) - \tau_{a1}(\lambda)]} \quad (7)$$

$$\tau_{a1}(\lambda) = K_1(\lambda) Z_1 - \tau_{m1}(\lambda) \quad (8)$$

$$\tau_{m1}(\lambda) = \tau_m(z, \lambda) - \tau_{m2}(\lambda) \quad (9)$$

$$\tau_{m2}(\lambda) = \tau_m(Z_1, \lambda) \quad (10)$$

$$\tau_{ms}(z, \lambda) = 0.0088 \lambda^{-4.15+0.2\lambda} \times \exp(-0.1188z - 0.00116z^2) \quad (11)$$

$\tau_{m1}(\lambda)$ 和 $\tau_{m2}(\lambda)$ 分别为 λ 波段的第一层和第二层大气分子光学厚度, $\tau_{ms}(z, \lambda)$ 为从大气层顶到高度 z 处的大气分子散射光学厚度^[15]. 对于非气体吸收波段, $\tau_{ms}(z, \lambda)$ 即为从大气层顶到高度 z 处的大气分子光学厚度 $\tau_m(z, \lambda)$.

通常获取气溶胶标高采用式(12)~(15)计算^[7-9], 同时需要整层大气气溶胶光学厚度与地面气溶胶消光系数, 即

$$H_a(\lambda) = \frac{\tau_a(\lambda)}{\sigma_a(0, \lambda)} \quad (12)$$

$$\sigma_a(0, \lambda) = \frac{3.912}{V_H(550)} \left(\frac{550}{\lambda}\right)^q - \sigma_m(0, \lambda) \quad (13)$$

$$q = \begin{cases} 0.585V_H^{1/3} & V_H < 6\text{km} \\ 1.3 & 6\text{km} \leq V_H < 50\text{km} \\ 1.6 & V_H \geq 50\text{km} \end{cases}$$

$$\sigma_m(z, \lambda) = \beta_m(z, \lambda) \frac{8}{3} \pi \quad (14)$$

$$\beta_m(z, \lambda) = 1.54 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{z}{7}\right) \left(\frac{532}{\lambda}\right)^4 \quad (15)$$

$\sigma_m(z, \lambda)$ 为高度 z 处 λ 波段的分子消光系数, $\beta_m(z, \lambda)$ 为高度 z 处 λ 波段的分子后向散射系数^[16].

2 实验数据

2013年12月25日~2014年1月25日利用太阳光度计 POM-02 和能见度仪在合肥进行大气观测实验. 其中, 2013年12月31日、2014年1月21日、1月22日和1月23日几天上午晴朗无云, POM-02 太阳光度计的测量时间 7:25~12:00, 对应的太阳天顶角范围为 $53^\circ \sim 84.2^\circ$. 图2中各天大气总光学厚度随太阳天顶角的变化呈比较好的水平直线分布, 其中500nm波段的大气总光学厚度的方差分别为0.000206、0.000076、0.000080、0.000102, 即这几天上午大气总光学厚度起伏不大, 说明大气状况较稳定, 将其数据用作分层分析.

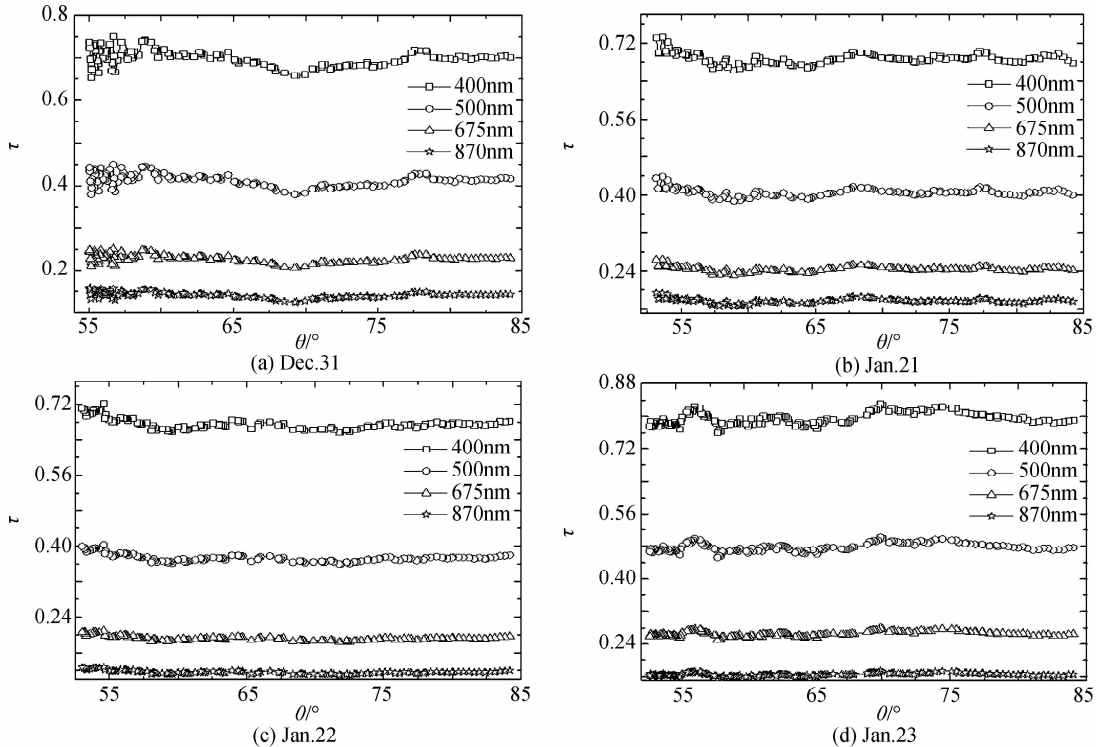


图2 大气总光学厚度随太阳天顶角的变化

Fig. 2 Variation of total atmospheric optical depth with solar zenith angle

3 第二层大气光学厚度

在低层大气消光主要受气溶胶的影响,气溶胶主要聚集在 $0 \sim 5\text{km}$, 20km 以上分子消光占主导因素^[17]. 由于上层大气十分稀薄,大气消光总垂直高度可以分别取为 100km 、 90km 、 80km 、 70km 、 60km 、 50km 进行分层分析.

当第一层大气厚度取值较小时,第二层大气消光包含气溶胶消光和大气分子消光;当第一层大气厚度增大到某一个值 Z_1' 时,必定会出现大气气溶胶几乎全部聚集在第一层,而第二层几乎没有气溶胶. 因而 Z_1' 在数值上就等于气溶胶垂直分布高度. 此时,第一层大

气光学厚度 $K_1'(\lambda)Z_1'$ 等于气溶胶光学厚度 $\tau_a(\lambda)$ 加上第一层大气分子光学厚度 $\tau_{m1}'(\lambda)$,第二层大气光学厚度 $K_2'(\lambda)Z_2'$ 等于第二层的大气分子光学厚度 $\tau_{m2}'(\lambda)$,即

$$K_1'(\lambda)Z_1' = \tau_a(\lambda) + \tau_{m1}'(\lambda) \quad (16)$$

$$K_2'(\lambda)Z_2' = \tau_{m2}'(\lambda) \quad (17)$$

图 3 给出总高度分别为 100 km 、 90 km 、 80 km 、 70 km 、 60 km 、 50 km 时 2013 年 12 月 31 日、2014 年 1 月 21 日、1 月 22 日和 1 月 23 日几天上午 500nm 波段第二层大气光学厚度随第一层大气厚度的变化(图 3 中曲线为第二层分子光学厚度 τ_{m2}).

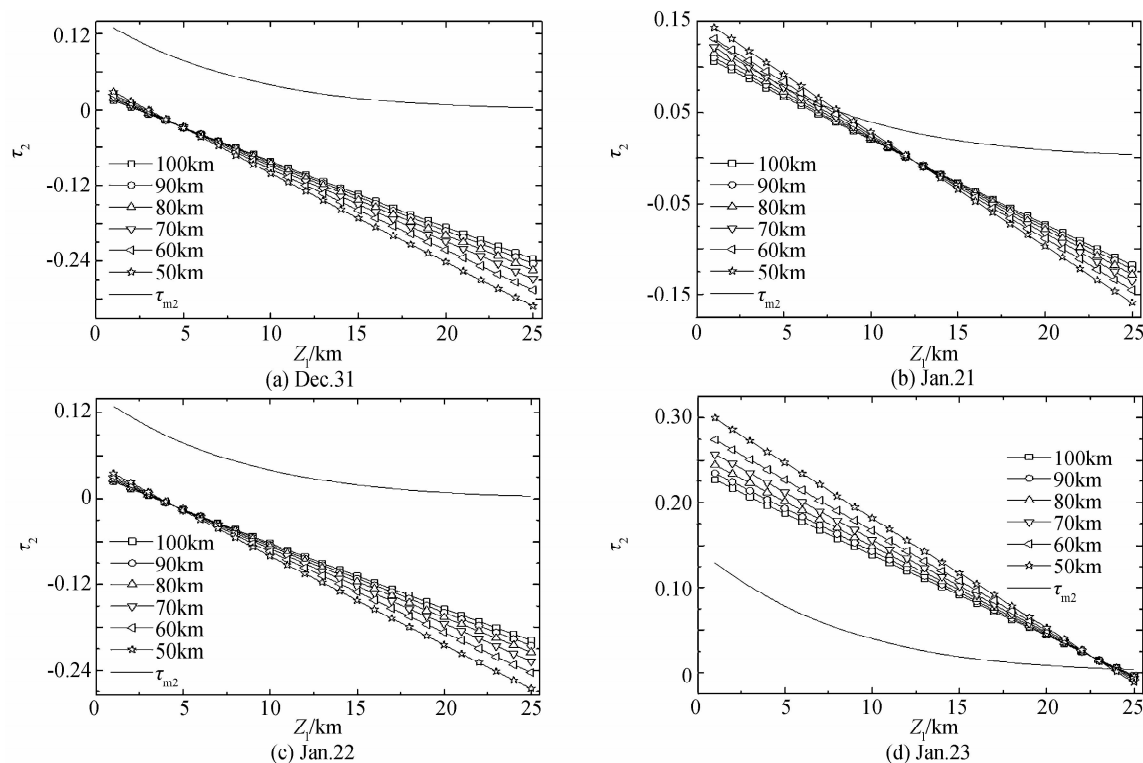


图 3 不同总高度时第二层大气光学厚度随第一层大气厚度的变化

Fig. 3 Variation of atmospheric optical depth of the second layer with atmospheric depth of the first layer for different whole altitude

从图 3 中可看出,第二层大气光学厚度随第一层大气厚度呈线性分布,且随着总高度的减小,直线斜率的绝对值逐渐增大;不同总高度计算的第二层大气光学厚度都交于一点;随着总高度的减小,当第一层大气厚度小于交点处的值时,第二层大气光学厚度逐渐增大,当第一层大气厚度大于交点处的值时,第二层大气光学厚度逐渐减小. 气溶胶一般分布在 $0 \sim 5\text{km}$, 即当第一层大气厚度 Z_1 在 5km 左右时,第二层大气光学厚度与第二层大气分子光学厚度曲线应该有交点,然而图 3 中除 1 月 21 日外,无论总高度取多大,第二层大气光学厚度与第二层大气分子光学厚度都得不到合理的交点. 这可能与两方面的原因有关:其一,平行球面大气分层在太阳天顶角比较大的时候表现得比较明

显,而当太阳天顶角比较小时平行球面不能充分体现出来,因而分层分析进行多元线性回归时可能需要对太阳天顶角取值范围进行选择;其二,从这几天大气总光学厚度的方差可以看到,1 月 21 日上午大气总光学厚度的方差最小,大气最稳定,因而分层算法可能也与大气稳定度有关.

4 太阳天顶角的选择

由于从清晨到正午随着时间的推移太阳天顶角变化越来越慢,因而越靠近较小角度的太阳天顶角,数据越密集. 当选取太阳天顶角 θ 的范围为 $53^\circ \sim 60^\circ$ 进行两层分析时,由于此时主要受较小角度的太阳天顶角影响,2013 年 12 月 31 日、2014 年 1 月 21 日、1 月 22

日和1月23日几天上午无论总高度和第一层大气厚度取值,多元线性回归得到的第一层和第二层大气平均消光系数 $K_1(\lambda)$ 和 $K_2(\lambda)$ 总会不同程度地为负值,从而得不出合理的大气总光学厚度.当 $\theta > 60^\circ$ 和 $\theta > 70^\circ$ 时,当第一层大气厚度小于某一值时,无论总高度取为何值, $K_1(\lambda)$ 和 $K_2(\lambda)$ 都为正数.当取较大的太阳天顶角,但天顶角范围比较小时,此时由于数据点比较少,若大气状态有波动,会使得两层算法不稳定;例如当 $\theta > 80^\circ$ 时,除12月31日上午第一层大气厚度小于某一值时,无论总高度取为何值, $K_1(\lambda)$ 和 $K_2(\lambda)$ 都为正数外,其余三天都会不同程度的取为负值;从图2可看到,当 $\theta > 80^\circ$ 时,除12月31日大气波动不太明显外,其余三天都有相对较明显的波动.以上分析表明,进行两层分析时,需要含有天顶角较大的数据,才能保

证第一层和第二层大气平均消光系数 $K_1(\lambda)$ 和 $K_2(\lambda)$ 都大于0;当取较大的天顶角进行两层分析时,为降低分层算法对大气稳定度的要求,要适当将天顶角范围取大一点;但是从图3可看到,若天顶角范围取得太大时,小角度的太阳天顶角数据对计算结果会有影响;因而,一般天顶角最小要大于 60° .

综合考虑小角度的太阳天顶角以及大气稳定度对分层算法的影响,最终12月31日、1月21日、1月22日、1月23日的最佳太阳天顶角范围为 $\theta > 63^\circ$ 、 $\theta > 69^\circ$ 、 $\theta > 68.3^\circ$ 、 $\theta > 68^\circ$.图4给出这几天最佳太阳天顶角范围时不同总高度下500nm波段的第二层大气光学厚度随第一层大气厚度的变化(图4中曲线为第二层分子光学厚度 τ_{m2}).

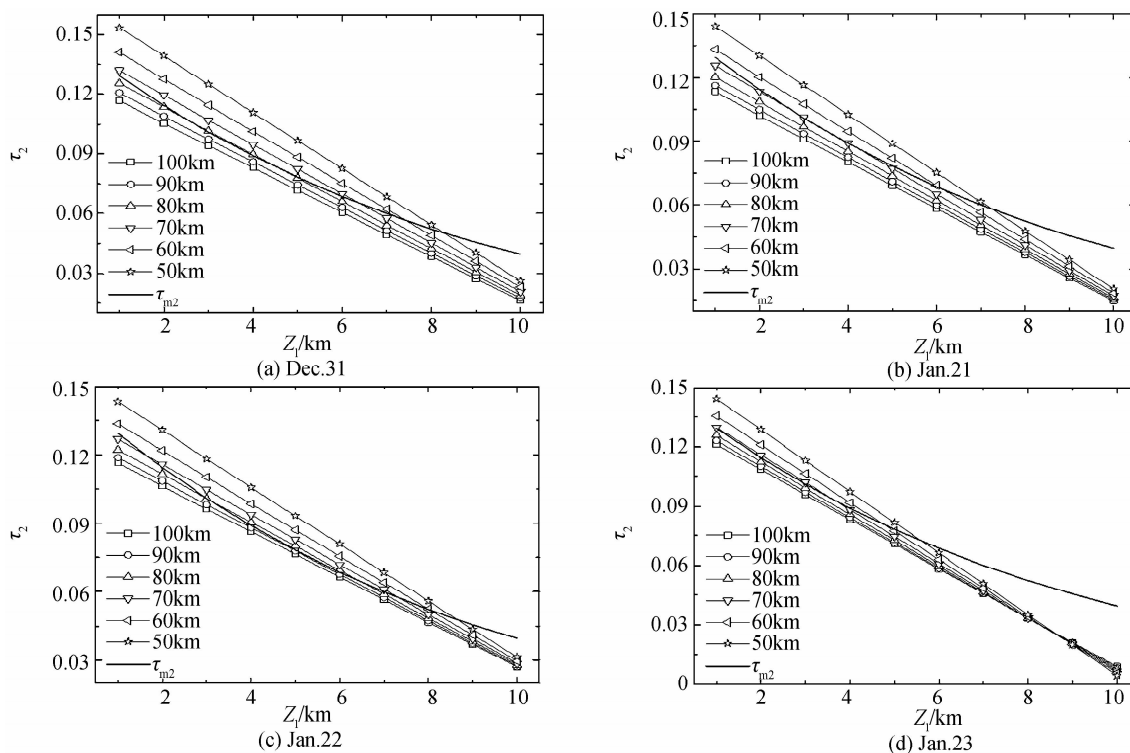


图4 不同总高度时第二层大气光学厚度随第一层大气厚度的变化

Fig. 4 Variation of atmospheric optical depth of the second layer with atmospheric depth of the first layer for different whole altitude

从图4可看出,随着总高度的减小, $\tau_2 > \tau_{m2}$ 时对应的第一层大气厚度的取值范围越来越大;若总高度过大,第二层大气光学厚度与第二层大气分子光学厚度曲线会没有交点,或者当 $\tau_2 > \tau_{m2}$ 时对应的第一层大气厚度的取值范围比较小;若总高度过小,会导致第二层大气光学厚度与第二层大气分子光学厚度曲线交点处对应的第一层大气厚度过大.12月31日、1月21日、1月22日、1月23日的总高度分别取60~75km、50~65km、60~75km、30~60km时,第二层大气光学厚度与

第二层大气分子光学厚度曲线在第一层大气厚度 Z_1 等于4~8km有交点,且当 $\tau_2 > \tau_{m2}$ 时对应的第一层大气厚度区间相对比较大.

5 第一层大气光学厚度

图5给出各天取最佳太阳天顶角范围、总高度为100km时500nm波段第一层大气光学厚度随第一层大气厚度的变化.

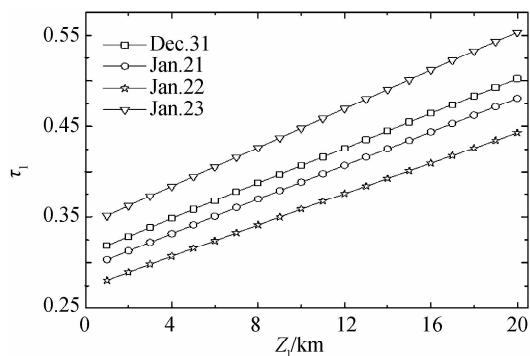


图5 第一层大气光学厚度随第一层大气厚度的变化
Fig. 5 Variation of atmospheric optical depth of the first layer with atmospheric depth of the first layer

从图5知,第一层大气光学厚度随第一层大气厚度线性增大,线性拟合为

$$\tau_1(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)Z_1 \quad (18)$$

拟合系数都大于99.99%,截距 $a(\lambda)$ 分别等于0.30988、0.29456、0.27275、0.34137,它表示当 Z_1 等于0时的第一层的大气光学厚度,这与实际不符.当 Z_1 等于0时,第一层大气光学厚度应等于0.造成该现象的原因主要是当 Z_1 趋近0时,第一层大气路径 $L_1(\theta)$ 的值过小且随太阳天顶角的变化 $L_1(\theta)$ 的变化范围也比较小,从而导致多元线性回归计算出的第一层大气平均消光系数 $K_1(\lambda)$ 过大, Z_1 越趋近0, $K_1(\lambda)$ 就越趋近无穷,这是由多元线性回归本身的性质所决定的.因而进行多元线性回归时 Z_1 的值不能太小.

按照式(18)的线性变化关系,当 Z_1 大于某个值 Z_1^0 时,必定会出现第一层大气光学厚度 $\tau_1(\lambda)$ 大于大气总光学厚度,导致第二层大气光学厚度小于0,因而 Z_1 也不能取值过大.

综上,要想利用分层算法计算出合理的分层大气的特性必须选择合适的第一层大气厚度 Z_1 .

6 分层算法获取气溶胶标高

为部分抵消分层算法的计算误差,式(7)中的气溶胶光学厚度 $\tau_a(\lambda)$ 采用式(16)中的 $\tau_a(\lambda)$,即 $\tau_a(\lambda) = K_1'(\lambda)Z_1' - \tau_{m1}'(\lambda)$ ($\tau_{m1}'(\lambda)$ 表示第一层的大气分子光学厚度,此时大气气溶胶全部聚集在第一层).则式(7)可改写为

$$H_a(\lambda) = \{Z_1\} / \{\ln[K_1'(\lambda)Z_1' - \tau_{m1}'(\lambda)] - \ln[K_1'(\lambda)Z_1' - \tau_{m1}'(\lambda) - K_1(\lambda)Z_1 + \tau_{m1}(\lambda)]\} \quad (19)$$

表1给出利用式(12)~(15)(常规方法)计算的12月31日、1月21日、1月22日、1月23日上午太阳天顶角分别取 $\theta > 63^\circ$ 、 $\theta > 69^\circ$ 、 $\theta > 68.3^\circ$ 、 $\theta > 68^\circ$ 时500nm波段平均气溶胶标高 $H_a(500)$.

表1 常规方法计算气溶胶标高

Table 1 Aerosol scale height calculated by conventional method

Date	$\tau_a(500)$	$\sigma_a(500)$	$H_a(500)/\text{km}$
Dec. 31	0.2786	0.2690	1.036
Jan. 21	0.2590	0.2689	0.963
Jan. 22	0.2365	0.1946	1.215
Jan. 23	0.3168	0.2504	1.265

图6给出不同总高度下分层算法计算的几个半天太阳天顶角分别取 $\theta > 63^\circ$ 、 $\theta > 69^\circ$ 、 $\theta > 68.3^\circ$ 、 $\theta > 68^\circ$ 时500nm波段气溶胶标高 $H_a(500)$ 随第一层大气厚度 Z_1 的变化(根据图4知,12月31日、1月21日、1月22日、1月23日的最佳总高度分别为60~75km、50~65km、60~75km、30~60km).

从图6可看出,随着第一层大气厚度的增大,分层算法计算的气溶胶标高先快速增大,后急剧减小,在最大值附近有一段变化比较平缓的区间.由于多元线性回归时所选取的数据是某一个时间段以内的数据,则分层算法计算的气溶胶标高 $H_a(500)$ 为这段时间内的平均值,这就要求随着第一层大气厚度 Z_1 的变化计算出的气溶胶标高 $H_a(500)$ 不变.因此分层算法计算的气溶胶标高应该在最大值附近变化平缓区取得,从而限定了第一层大气厚度 Z_1 的取值范围. $H_a(500)$ 增大到最大值后急剧减小,是因为当第一层大气厚度增大到一定程度后继续增大时第一层大气气溶胶光学厚度就越来越趋近整层大气气溶胶光学厚度,而根据式(7)知当第一层大气气溶胶光学厚度趋近整层大气气溶胶光学厚度时分母趋近无穷,从而导致分层算法计算的气溶胶标高急剧减小;由图5知第一层大气厚度不能取值太小,因而气溶胶标高随第一层大气厚度快速增大的区域是分层算法应该去掉的区域.

另外,从图6中还可看到,随着总高度的减小,气溶胶标高逐渐增大,因而要得到准确的气溶胶标高,就必须进一步选择合理的总高度.12月31日、1月21日、1月22日、1月23日当总高度分别取为71km、62.5km、72和75km、45km时,气溶胶标高随第一层大气厚度的增加而减小的速率比其它总高度时快.根据(7)式,当第一层大气气溶胶光学厚度越趋近整层大气气溶胶光学厚度时,气溶胶标高减小的速率越快.因此,这里将气溶胶标高随第一层大气厚度增加而减小的速率较快时对应的总高度定为最佳总高度.这里进一步确定12月31日、1月21日、1月22日、1月23日分层算法的最佳总高度分别为71km、62~63.5km、71~75km、45~46km.

气溶胶标高最大值 $H_a^{\max}(500)$ 附近变化比较平缓区,选取最大值左侧微商小于0.1(第一层大气厚度间

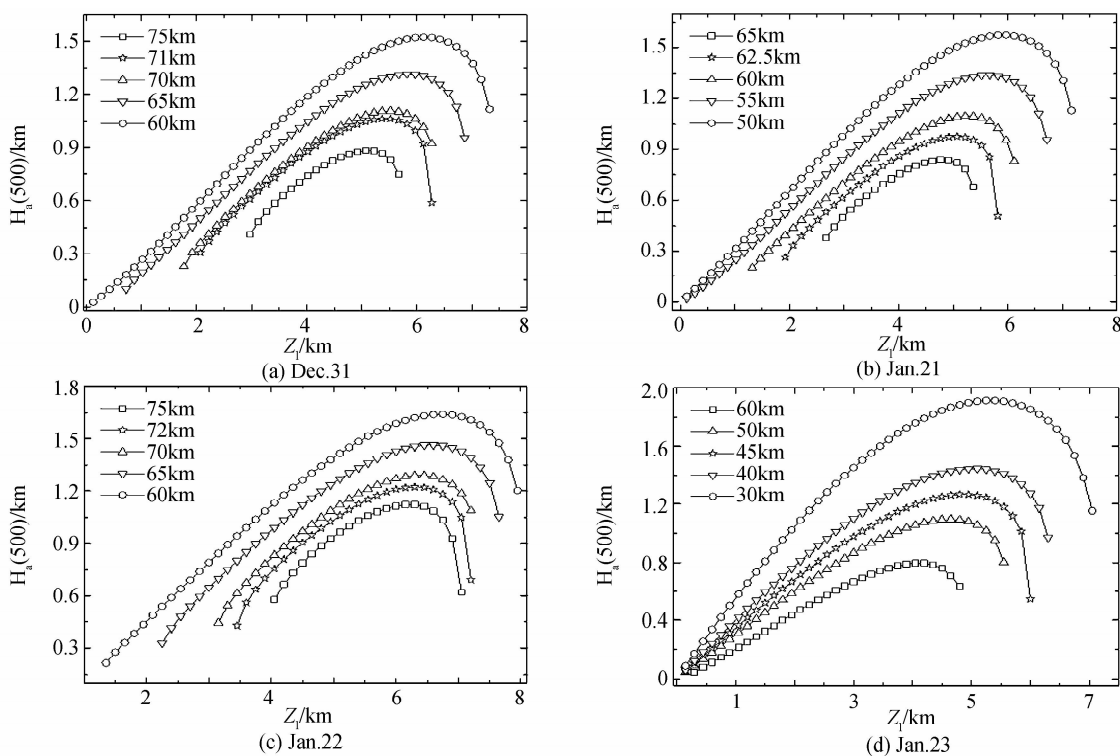


图6 不同总高度时分层算法计算的气溶胶标高随第一层大气厚度的变化

Fig. 6 Variation of aerosol scale height with atmospheric depth of the first layer calculated by atmospheric stratified algorithm for different whole altitude

隔 0.03km 的 $H_a(500)$ 数据以及最大值右侧大于等于左侧所选取的最小 $H_a(500)$ 的数据, 将它们的平均值作为分层算法计算的 500nm 波段气溶胶标高 $H_a'(500)$, 并且同时可由此来确定分层算法的第一层大气厚度最小取值 Z_1^{\min} . 表 2 给出最佳总高度下计算的气

溶胶标高及其与常规算法所得结果的相对误差, 以及分层算法的最小第一层大气厚度 Z_1^{\min} 和 $\tau_2 = \tau_{m2}$ 时 Z_1 的值(即气溶胶垂直分布高度, 也是分层算法的第一层大气厚度最大取值 Z_1^{\max}).

表 2 分层算法计算的气溶胶标高

Table 2 Aerosol scale height calculated by stratified algorithm

Date	Total altitude/km	$H_a'(500) / \text{km}$	Relative error	Z_1^{\min} / km	Z_1^{\max} / km
Dec. 31	71	1.057	2.03%	5.01	6.28
Jan. 21	62~63.5	0.916~1.000	0~4.88%	4.59~4.71	5.68~5.90
Jan. 22	71~75	1.115~1.255	0~8.23%	5.88~5.97	6.99~7.29
Jan. 23	45~46	1.218~1.256	0.71%~3.72%	4.35~4.38	5.94~6.03

表 2 表明, 当选取合理的太阳天顶角范围、总高度和第一层大气厚度时, 根据分层算法可由太阳光度计一种仪器获得比较准确的气溶胶标高, 同时得到大气气溶胶的垂直分布高度.

7 大气总光学厚度相对误差

将 12 月 31 日、1 月 21 日、1 月 22 日、1 月 23 日上午太阳天顶角范围分别为 $\theta > 63^\circ$ 、 $\theta > 69^\circ$ 、 $\theta > 68.3^\circ$ 、 $\theta > 68^\circ$ 的数据按表 2 中所给出的最佳总高度及其对应的第一层大气厚度进行两层分析, 计算分层算法相对

整层算法计算的大气总光学厚度的相对误差绝对值, 结果如图 7 所示.

由图 7 可看到, 1 月 23 日同 12 月 31 日、1 月 21 日、1 月 22 日大气总光学厚度相对误差的绝对值变化趋势不同, 是因为 1 月 23 日的相对误差为正, 而其它三天的相对误差为负. 当选取合理的总高度和第一层大气厚度时, 12 月 31 日、1 月 21 日、1 月 22 日、1 月 23 日上午分层算法计算的大气总光学厚度的相对误差绝对值分别小于 1.00%、0.87%、1.65%、1.06%. 这说明分层算法能够得到比较准确的大气总光学厚度.

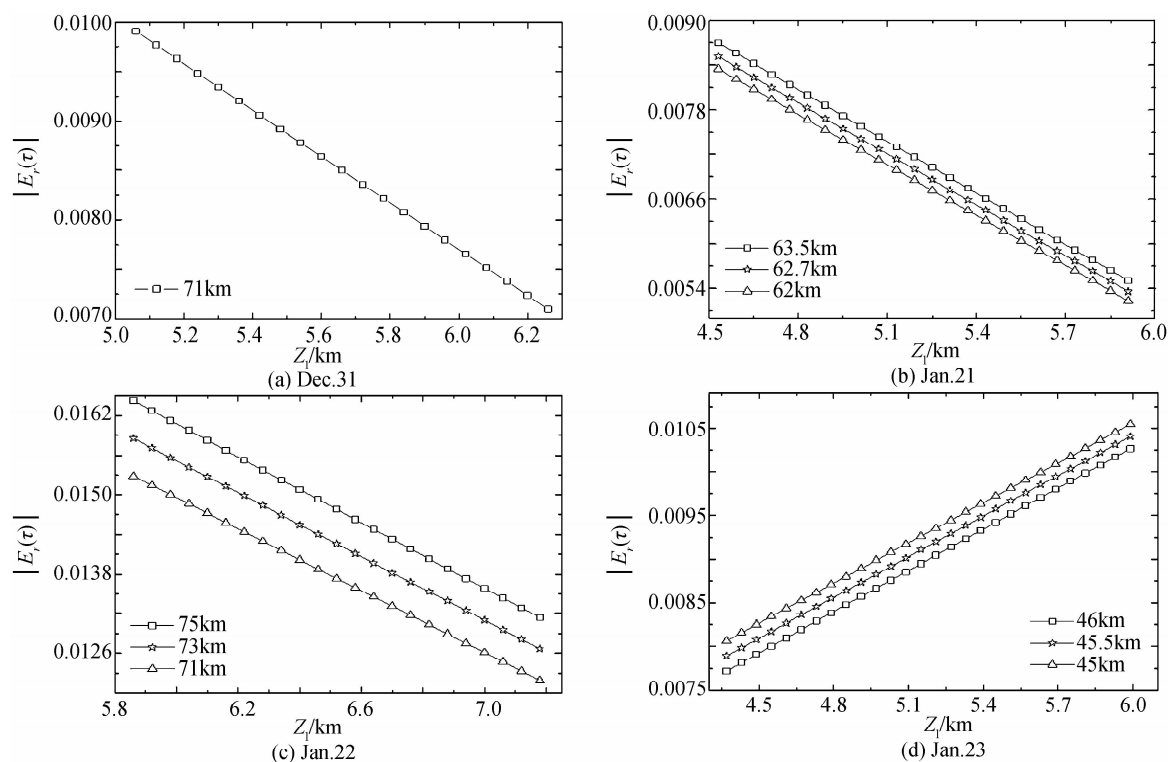


图7 分层算法计算的大气总光学厚度相对误差的绝对值

Fig.7 Absolute value of relative error of total atmospheric optical depth calculated by stratified algorithm

8 结论

基于均匀平行球面大气分层假定,由于小角度的太阳天顶角不能充分体现平行球面大气分层特征,分层算法需选取较大的太阳天顶角和适当的太阳天顶角范围,一般天顶角最小要大于 60° .当第二层大气光学厚度等于第二层大气分子光学厚度时,第一层大气厚度在数值上就等于大气气溶胶垂直分布高度,但不同的总高度计算得到的大气气溶胶垂直分布高度不同,因而需选定最佳大气消光总高度.另外,由于分层算法得到的第一层大气光学厚度与第一层大气厚度呈线性分布关系,因而第一层大气厚度的取值不能太小也不能太大,为得到准确的第一层和第二层大气光学厚度还需确定最佳的第一层大气厚度.由于大气气溶胶一般分布在 $0\sim 5\text{km}$,可据此来初步确定分层算法的总高度以及第一层大气厚度.

在分层算法的基础上,进一步研究了仅利用太阳光度计一种仪器来获取大气气溶胶标高的方法.结果表明,当第一层大气气溶胶光学厚度越接近总的大气气溶胶光学厚度时,由分层算法得到的气溶胶标高急剧下降,当选取的总高度比较合理时,气溶胶标高下降的越快,因而可由此最终确定分层算法中所需总高度和第一层大气厚度的最佳取值范围,并最终获得了比较准确的气溶胶标高、气溶胶垂直分布高度以及大气总光学厚度.

参考文献

- [1] ZHOU Ren-jun, LIU Peng-bing, ZHOU Wen, *et al.* The analysis of Quasi-Biennial Oscillation characteristics of Stratospheric Aerosol[J]. *Chinese Journal of Geophys*, 2011, **54**(5):1175-1181.
周任君,刘鹏兵,周文,等.平流层气溶胶的准两年周期特征分析[J].*地球物理学报*,2011,**54**(5):1175-1181.
- [2] UZHEGOV V N, PKHALAGOV Y A, KABANOV D M, *et al.* The height of homogeneous aerosol atmosphere in visible and IR wavelength range[C]. SPIE, 2004, **5473**, DOI: 10.1117/12.901090.
- [3] CALVELLO M, ESPOSITO F, LEONE L, *et al.* Hight resolution measurement of aerosol equivalent scale height over wide range[J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2008, **16**: 61-66.
- [4] QIU J H. Broadband extinction method to determine aerosol optical depth from accumulated direct solar radiation [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2003, **42**:1611-1624.
- [5] QIU J H, ZONG X M, ZHANG X Y. A study of the scaling height of the tropospheric aerosol and its extinction coefficient profile[J]. *Aerosol Science*, 2005, **36**(3):361-371.
- [6] WMO (1983). Guide to meteorological instruments and methods of observation(7th ed.)(470pp). WMO-No. 8.
- [7] HAN Yong, FAN Wei, RAO Rui-zhong, *et al.* Aerosol scale height of visible light-wave in experimentation study [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, **1**(1): 33-40.
韩永,范伟,饶瑞中,王英俭.可见光波段气溶胶标高的实验研究[J].*大气与环境光学学报*,2006,**1**(1):33-40.
- [8] HAN Yong, RAO Rui-zhong, WANG Ying-jian. Multi-wavelength spectral aerosol scale height in inshore in contrast with that in inland[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(1): 33-37.
韩永,饶瑞中,王英俭.沿海和内陆地区多波长光谱气溶胶标

- 高的比较分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, **29**(1):33-37.
- [9] WONG M S, NICHOL J E, LEE K H. Modeling of aerosol vertical profiles using GIS and remote sensing[J]. *Sensors*, 2009, **9**(6):4380-4389.
- [10] ANSMANN A, RIEBSELL M, WEIKAMP C. Measurement of atmospheric aerosol extinction profile with Raman lidar [J]. *Optics Letters*, 1990, **15**(13):746-748.
- [11] MATTHAIS V, FREUDENTHALER V, AMODEO A, *et al.* Aerosol lidar intercomparison in the framework of the EARLINET project 1 Instruments [J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(4):961-976.
- [12] MCCORMICK M P. Spaceborne lidars[J]. *The Review of Laser Engineering*, 1995, **23**(2):89-93.
- [13] SPINHIRNE J D, REAGEN J A, HERMAN B M. Vertical distribution of aerosol extinction cross section and inference of aerosol imaginary index in the troposphere by lidar technique [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1980, **19**:426-438.
- [14] XU Meng-chun, XU Qing-shan, BIAN Jian, *et al.* Extinction coefficient of stratified atmosphere measured by sun-photometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(12):1201002.
- 徐梦春,徐青山,边健,等. 基于太阳光度计测量确定分层大气消光系数[J]. 光学学报, 2014, **34**(12):1201002.
- [15] HAN Yong, RAO Rui-zhong, WANG Ying-jian. Multi-wavelength aerosol optical characteristics obtained by atmospheric visibility[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(2):265-269.
- 韩永,饶瑞中,王英俭. 利用大气能见度获取多波长气溶胶光学特性. 红外与激光工程[J], 2007, **36**(2):265-269.
- [16] YUE Bin, DONG Jing-jing, SUN Dong-song, *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. 红外与激光工程[J], 2009, **38**(1):135-139.
- [17] 周秀骥,陶善昌,姚克亚. 高等大气物理学[M]. 北京:气象出版社,1991:90-1106.