

气溶胶粒子特性和垂直分布对辐射的影响

徐梦春^{1,2}, 徐青山¹

(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, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 数值模拟了在给定条件下气溶胶粒子群平均有效半径和折射率虚部不同时大气层顶的反射强度和到达地面的透射强度, 以及不同气溶胶垂直分布对各高度层的反射、透射强度和辐照度的影响。结果表明, 当大气气溶胶光学厚度相同时, 气溶胶垂直分布对 15 km 以下的反射和透射辐射影响较大; 气溶胶粒子群平均有效半径和折射率虚部越小, 大气层顶的反射强度和到达地面的透射强度越大。因此, 对于准确地计算大气辐射不仅需要考虑气溶胶总光学厚度, 还需考虑气溶胶粒子群的平均有效半径、复折射率和气溶胶垂直分布; 计算中若只使用气溶胶模型中的经验值会带来较大误差。

关键词: 大气光学; 复折射率; 气溶胶垂直分布; 反射辐射; 透射辐射

中图分类号: P422 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0211002

Effect of aerosol particle characteristic and vertical distribution on radiation

Xu Mengchun^{1,2}, Xu Qingshan¹

(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 100049, China)

Abstract: Under the given condition, reflected intensity of the top of atmosphere and transmitted intensity arriving at the ground were simulated when aerosol particles average effective radius and complex refractive imaginary part index was different, as well as the effect of aerosol vertical distribution on reflection and transmission intensity and flux of different height. The result shows that when the aerosol optical thickness is fixed, the effect of aerosol vertical distribution on reflection and transmission is great under 15 km, and the smaller aerosol particles average effective radius and complex refractive index imaginary part of aerosol particles, then the larger reflected intensity of the top of atmosphere and transmitted intensity arriving at the ground. Therefore, in order to accurately calculate atmospheric radiation, not only the aerosol optical thickness but also aerosol particles average effective radius, complex refractive index and aerosol vertical distribution should be taken into consideration, and just using the empirical value of the aerosol model will bring bigger error.

收稿日期: 2015-06-07; 修订日期: 2015-07-09

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106002-03)

作者简介: 徐梦春(1986-), 女, 博士生, 主要从事大气辐射传输方面的研究。Email: xumengchun1234@163.com

导师简介: 徐青山(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气辐射传输与图像大气校正方面的研究。Email: qshxu@aiofm.ac.cn

Key words: atmospheric optics; complex refractive index; aerosol vertical distribution; reflected radiation; transmitted radiation

0 引言

大气气溶胶是影响辐射传输的一个重要因素,它通过不断散射和吸收太阳短波辐射及地球长波辐射影响大气辐射传输,其散射和吸收特性由气溶胶数浓度、谱分布及复折射率等微物理特征决定^[1],其中大气气溶胶折射率决定了气溶胶在辐射和气候效应中的作用是加热还是冷却,同时它对气溶胶辐射效应和全球气候变化研究以及空间遥感大气订正具有重要意义^[2]。尉东胶等分析发现宽谱太阳漫射辐射对大气气溶胶折射率虚部非常敏感,而对气溶胶粒子谱分布、气溶胶折射率实部等敏感性相对较弱^[3];徐魁等对不同激光波长、粒子折射率和粒子尺寸参数时气溶胶粒子对激光后向散射的影响进行了计算仿真^[4];刘校辰研究了不同初始浓度和谱分布特征的气溶胶粒子对暖云的影响^[5];高太长等研究指出气溶胶粒子折射指数和数密度的不同对散射特性影响较大^[6];李丽芳等研究表明气溶胶粒子半径与入射波长大小相近时气溶胶的消光最强^[7]。

大气气溶胶具有很强的时空变化特性,气溶胶的垂直分布特征是目前大气辐射强迫和气候环境影响研究的重要不确定因素^[8]。因而,为精确计算辐射传输和探究气溶胶对气候的影响,气溶胶的垂直分布需加以考虑。Gordon 和 Duforet 等指出气溶胶吸收性较强时大气层顶反射函数依赖于气溶胶垂直分布^[9-10];Liao H 等研究发现,晴空时长波辐射强迫、云辐射强迫和大气层顶短波辐射强迫对沙尘气溶胶层分布高度较敏感^[11];罗燕等也发现大气层顶辐射强迫对垂直分布较敏感^[12];Meloni D 等指出大气层顶短波辐射强迫与气溶胶垂直分布具有很强的一致性^[13];Zhu A 和 Li C 等提出沙尘气溶胶的垂直分布特征是客观评价沙尘气溶胶辐射强迫和气候效应的重要参数^[14-15];Qiu Jinhuan 研究了整层均匀和双层分层时气溶胶垂直分布对大气层顶向上辐射和对卫星遥感地表反射率的影响^[16];边健等研究了气溶胶垂直非均一分布对天空背景亮度的影响^[17]。

文中通过联合使用米程序 MMP3.2 和倍加累

加程序 DAK,模拟了不同大气气溶胶粒子大小、复折射率虚部、气溶胶垂直分布对反射和透射辐射的影响。

1 数值模拟方案

Junge 谱可以近似描述大气中半径介于 0.1~2 μm 间的气溶胶粒子的分布^[18]:

$$n(r)=cr^{-\nu} \quad (1)$$

式中: $n(r)$ 为每单位体积内每单位粒子半径间隔内粒子数量; c 与指数 ν 、气溶胶粒子群的最大最小半径有关;指数 ν 一般在 2~4 之间变化。当对公式(1)两边取对数时,Junge 分布为一直线, ν 决定了分布曲线的斜率,当气溶胶粒子群的最大、最小半径一定时, ν 决定了气溶胶粒子群的平均有效半径。

大气气溶胶一般随高度指数衰减^[17]:

$$\sigma_a(z, \lambda)=\sigma_a(0, \lambda)\exp\left[-\frac{z}{H_a(\lambda)}\right] \quad (2)$$

式中: $\sigma_a(z, \lambda)$ 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; $H_a(\lambda)$ 为气溶胶标高。气溶胶消光系数对高度积分可得整层大气气溶胶光学厚度:

$$\tau_a(\lambda)=\int_0^{\infty} \sigma_a(z, \lambda)dz=\sigma_a(0, \lambda)H_a(\lambda) \quad (3)$$

进而可得气溶胶标高:

$$H_a(\lambda)=\frac{\tau_a(\lambda)}{\sigma_a(0, \lambda)} \quad (4)$$

因而,若整层大气气溶胶光学厚度相同,但标高不同,则气溶胶垂直分布不同。

大气层顶的反射强度 I_{reflect} 和到达地面的透射强度 I_{transmit} 可表示为^[19]:

$$I_{\text{reflect}}(\mu_0, \mu, \Delta\phi, \lambda)=\frac{\mu_0 F_0 R(\mu_0, \mu, \Delta\phi, \lambda)}{\pi} \quad (5)$$

$$I_{\text{transmit}}(\mu_0, \mu, \Delta\phi, \lambda)=\frac{\mu_0 F_0 T(\mu_0, \mu, \Delta\phi, \lambda)}{\pi} \quad (6)$$

式中: $\mu_0=\cos\theta_0$; $\mu=\cos\theta$; θ_0 和 θ 分别为太阳天顶角和观测天顶角; $\Delta\phi=|\phi_0-\phi|$ 为相对方位角, ϕ_0 和 ϕ 分别为太阳方位角和观测方位角; $R(\mu_0, \mu, \Delta\phi, \lambda)$ 和 $T(\mu_0, \mu, \Delta\phi, \lambda)$ 分别为反射函数和透射函数; F_0 为大气层顶太阳辐照度。倍加累加程序 DAK 中将太阳出射强度进行归一化,令 $F_0=\pi$,则公式(5)和(6)可简化为:

$$I_{\text{reflect}}(\mu_0, \mu, \Delta\phi, \lambda) = \mu_0 R(\mu_0, \mu, \Delta\phi, \lambda) \quad (7)$$

$$I_{\text{transmit}}(\mu_0, \mu, \Delta\phi, \lambda) = \mu_0 T(\mu_0, \mu, \Delta\phi, \lambda) \quad (8)$$

DAK 假定大气为平行平面模型,将整层大气分为若干层,通过输入地表反照率、大气廓线、气溶胶廓线和相函数等参数,可计算出各高度层的反射和透射信息^[19-20]。这里主要考虑气溶胶粒子半径、折射率虚部和气溶胶垂直分布对辐射的影响。

具体流程:假设大气气溶胶遵循 Junge 谱分布,气溶胶粒子群的半径介于 0.1~2 μm 之间, Junge 指数 ν 分别取 2、2.5、3、3.5、4,由米程序 MMP3.2 可计算出对应的气溶胶粒子群的平均有效半径 \bar{r} ,如表 1 所示。从表 1 可以看出,随着 ν 的增大,气溶胶粒子群的平均有效半径逐渐减小。

表 1 Junge 指数与气溶胶粒子平均有效半径

Tab.1 Junge exponent and the average effective radius of aerosol particles

ν	2	2.5	3	3.5	4
$\bar{r}/\mu\text{m}$	1.050	0.849	0.634	0.447	0.315

输入不同的 Junge 指数 ν 和气溶胶粒子折射率虚部,由米程序 MMP3.2 计算折射率实部 $n_r=1.33$ (气溶胶粒子的折射率实部在可见光波段取值范围通常为 1.33~1.60^[21])时 0.5 μm 波段气溶胶粒子的不对称因子、散射截面、消光截面、散射矩阵等;将 MMP3.2 计算的结果代入 DAK 中,并在 DAK 中选择地表为植被、大气廓线选中纬度夏季、假定 0.5 μm 波段整层大气气溶胶光学厚度 $a=0.3$,取不同的气溶胶标高进行模拟计算,文中的大气层顶指海拔 100 km 处。

2 气溶胶粒子半径和折射率虚部对辐射的影响

模拟计算太阳天顶角 $\theta_0=30^\circ$ 、观测天顶角 $\theta=45^\circ$ 、折射率实部 $n_r=1.33$ 、气溶胶标高 $H_a=1$ km 时,大气层顶的反射强度 I_{reflect} 和到达地面的透射强度 I_{transmit} 随相对方位角 $\Delta\phi$ 的变化(Δ 的取值范围 $30^\circ\sim 180^\circ$)。

图 1 设折射率虚部不变($n_i=0.02$),而 Junge 指数 ν 逐渐增大。从图 1 中可以看出,随着相对方位角的增大,大气层顶的反射强度逐渐增大,到达地面的透射强度逐渐减小;随着 Junge 指数 ν 的增大(气溶胶粒子群平均有效半径的减小),大气层顶的反射强度

和到达地面的透射强度都逐渐增大。造成该现象的主要原因可能是:当气溶胶光学厚度一定时,气溶胶粒子半径越小,则气溶胶粒子的数密度越大,散射增强,从而导致整层大气的反射和透射都增大。

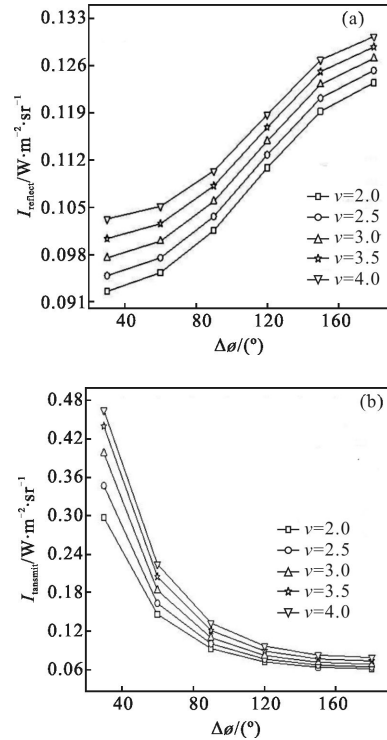
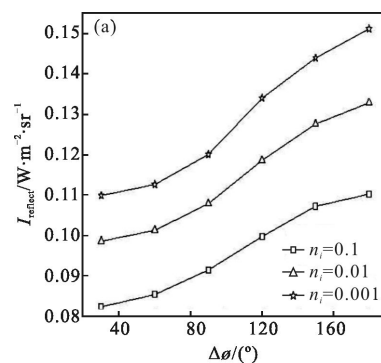


图 1 大气层顶的反射强度和到达地面的透射强度随 Junge 指数和相对方位角的变化

Fig.1 Variation of reflected intensity of the top of atmosphere and transmitted intensity arriving at the ground with Junge exponent and relative azimuth angle

图 2 设 Junge 指数不变($\nu=2.5$),而气溶胶粒子折射率虚部逐渐减小(一般 0.55 μm 波段城市气溶胶粒子折射率虚部在 0.01~0.1,乡村、海洋、远郊或土壤气溶胶粒子折射率虚部在 0.001~0.01^[21]),因此这里选取 n_i 范围为 0.001~0.1)。从图 2 中可以看出,随



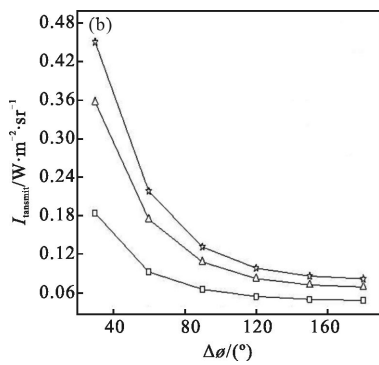


图 2 大气层顶的反射强度和到达地面的透射强度随折射率虚部和相对方位角的变化

Fig.2 Variation of reflected intensity of the top of atmosphere and transmitted intensity arriving at the ground with refractive index imaginary part and relative azimuth angle

随着气溶胶粒子折射率虚部的减小，大气层顶的反射强度和到达地面的透射强度都逐渐增大。这是因为折射率虚部与气溶胶粒子对光的吸收有关，折射率虚部越小，粒子的吸收越小，那么散射就越大。

3 气溶胶垂直分布对辐射的影响

图 3 设 Junge 指数 $\nu=2.5$ ，折射率 $n_r=1.33, n_i=0.02$ ，整层大气气溶胶光学厚度 $\tau_a=0.3$ ，气溶胶标高逐渐增大、分别取 $H_a=0.5、1.0、1.5、2.0$ km 时，给出 0~10.5 km 每一层(厚度 0.5 km)的气溶胶光学厚度 $\tau_a(\Delta z)$ 。如图 3 所示，当整层大气气溶胶光学厚度一定时，近地面层，随着气溶胶标高的增大，每层气溶胶光学厚度逐渐减小；当高度大于 1.5 km 时，随着气溶胶标高的增大，每层气溶胶光学厚度逐渐增大，到 8 km 左右时气溶胶光学厚度几乎等于 0。

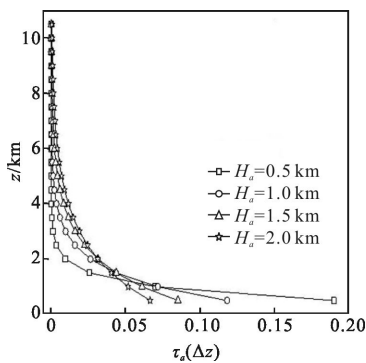


图 3 每一层气溶胶光学厚度

Fig.3 Aerosol optical depth of each layer

3.1 对整层大气辐射强度的影响

不同的气溶胶标高对应不同的气溶胶垂直分布状态，为计算不同气溶胶垂直分布对辐射的影响，这里以气溶胶标高 $H_a=0.5$ km 时的辐射强度为基底，则不同气溶胶标高时海拔高度 z 处的反射和透射强度相对偏差可表示为^[17]：

$$\Delta I_{\text{reflect}}(H_a, z) = \frac{I_{\text{reflect}}(H_a, z) - I_{\text{reflect}}(0.5, z)}{I_{\text{reflect}}(0.5, z)} \times 100\% \quad (9)$$

$$\Delta I_{\text{transmit}}(H_a, z) = \frac{I_{\text{transmit}}(H_a, z) - I_{\text{transmit}}(0.5, z)}{I_{\text{transmit}}(0.5, z)} \times 100\% \quad (10)$$

图 4 给出太阳天顶角 $\theta_0=30^\circ$ 、观测天顶角 $\theta=45^\circ$ 时，设 Junge 指数 $\nu=2.5$ ，折射率 $n_r=1.33, n_i=0.02$ ，气溶胶标高分别取 $H_a=1.0、1.5、2.0$ km 时大气层顶的反射强度 I_{reflect} 和到达地面的透射强度 I_{transmit} 的相对偏差随相对方位角 $\Delta\phi$ 的变化。

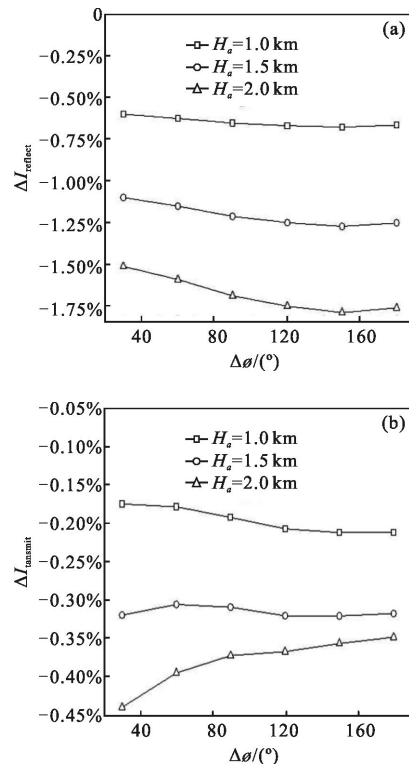


图 4 大气层顶的反射强度和到达地面的透射强度的相对偏差
Fig.4 Relative deviation of reflected intensity of the top of atmosphere and transmitted intensity arriving at the ground

从图 4 可以看出，大气层顶的反射强度和到达地面的透射强度的相对偏差都为负值，且随着气溶胶标高的增大，相对偏差的绝对值都逐渐增大，说明随着气溶胶标高的增大，大气层顶的反射强度和到达地面的透射强度都逐渐减小。相对方位角为 $30^\circ \sim$

180°时,气溶胶标高分别取 $H_a=1.0、1.5、2.0$ km,大气层顶的反射强度相对偏差在 $-0.6\% \sim -1.8\%$ 之间,到达地面的透射强度相对偏差在 $-0.15\% \sim -0.44\%$ 之间,相同标高时对应的相对方位角处大气层顶的反射强度的相对偏差绝对值大于到达地面的透射强度的相对偏差绝对值,说明气溶胶垂直分布对大气层顶的反射比对到达地面的透射影响大。

3.2 对各层大气辐射强度的影响

图 5 给出太阳天顶角 $\theta_0=30^\circ$ 、观测天顶角 $\theta=45^\circ$ 时,设 Junge 指数 $\nu=2.5$,折射率 $n_r=1.33, n_i=0.02$,气溶胶标高分别取 $H_a=1.0、1.5、2.0$ km 时各高度 z 处的反射强度 I_{reflect} 和透射强度 I_{transmit} 的相对偏差。

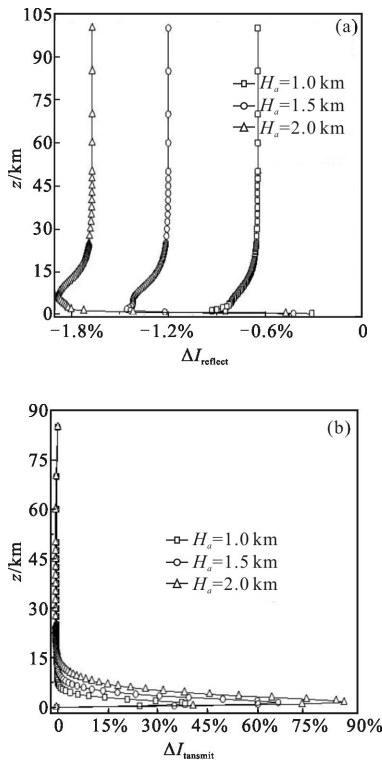


图 5 各层大气反射和透射强度的相对偏差

Fig.5 Relative deviation of reflected and transmitted intensity of each atmospheric layer

从图 5 中可以看出,各高度处大气反射强度的相对偏差都小于 0,且随着气溶胶标高的增大,相对偏差的绝对值越来越大,说明气溶胶标高越大,各高度层处大气反射强度越小。当气溶胶标高分别取 $H_a=1.0、1.5、2.0$ km 时,在海拔高度分别小于 1.5、2、6.5 km 时各高度处大气反射强度的相对偏差绝对值随高度增大逐渐增大,最大值分别为 0.93%、

1.46%、1.88%,之后其绝对值随高度增大逐渐减小,并在 30 km 左右都分别趋于稳定值 0.65%、1.20%、1.67%,说明气溶胶垂直分布对各高度处的反射强度都有影响,且在 15 km 以下其影响最大。当气溶胶标高分别取 $H_a=1.0、1.5、2.0$ km 时,在 15 km 以上各高度处大气透射强度的相对偏差变化缓慢,在 25 km 时其绝对值分别趋于稳定值 0.23%、0.46%、0.67%,并在海拔高度分别大于 1、1.5、1.5 km 时各高度处大气透射强度的相对偏差随高度减小逐渐增大,最大值分别为 38.08%、65.98%、85.69%,之后随高度减小逐渐减小,到达地面时大气透射强度的相对偏差小于 0,其绝对值分别为 0.18%、0.32%、0.42%。说明气溶胶垂直分布对到达地面的和 15 km 以上的大气透射强度影响比较小,但在地面上方 15 km 以内气溶胶垂直分布对大气透射强度影响非常大。

3.3 对各层大气辐照度的影响

辐照度是辐射强度法向分量的半球积分,根据公式(9)和(10),同理以气溶胶标高 $H_a=0.5$ km 时的辐照度为基底,则不同气溶胶标高时海拔高度 z 处的反射和漫射透射辐照度相对偏差可表示为:

$$\Delta F_{\text{reflect}}(H_a, z) = \frac{F_{\text{reflect}}(H_a, z) - F_{\text{reflect}}(0.5, z)}{F_{\text{reflect}}(0.5, z)} \times 100\% \quad (11)$$

$$\Delta F_{\text{transmit}}(H_a, z) = \frac{F_{\text{transmit}}(H_a, z) - F_{\text{transmit}}(0.5, z)}{F_{\text{transmit}}(0.5, z)} \times 100\% \quad (12)$$

式中: $F_{\text{transmit}}(H_a, z)$ 和 $F_{\text{transmit}}(H_a, z)$ 分别表示气溶胶标高为 H_a 时高度 z 处的反射辐照度和漫射透射辐照度。图 6 给出太阳天顶角 $\theta_0=30^\circ$ 时,设 Junge 指数 $\nu=2.5$,折射率 $n_r=1.33, n_i=0.02$,气溶胶标高分别取 $H_a=1.0、1.5、2.0$ km 时各高度 z 处的反射辐照度 F_{reflect} 和漫射透射辐照度 F_{transmit} 的相对偏差。

从图 6 中可以看出,各高度处大气反射辐照度的相对偏差都小于 0,且随着气溶胶标高的增大,相对偏差的绝对值越来越大,说明气溶胶标高越大,各层大气反射辐照度越小。当气溶胶标高分别取 $H_a=1.0、1.5、2.0$ km 时,在海拔高度分别小于 1、4.5、5.5 km 时各高度处大气反射辐照度的相对偏差绝对值整体上随高度增大逐渐增大,最大值分别为 1.64%、2.53%、3.26%,之后其绝对值随高度增大逐渐减小,并在 30 km 左右都分别趋于稳定值 0.88%、1.68%、2.40%,说明气溶胶垂直分布对各高度处的反射辐照度都有影响,且在 15 km 以下其影

响最大。不同气溶胶垂直分布对漫射透射辐照度的影响也主要集中在 15 km 以下,当气溶胶标高分别取 $H_0=1.0、1.5、2.0$ km 时,在 25 km 以上各高度处大气漫射透射辐照度的相对偏差绝对值分别趋于稳定值 0.25%、0.51%、0.73%,并在海拔高度分别大于 1、1.5、1.5 km 时各高度处大气漫射透射辐照度的相对偏差随高度减小逐渐增大,最大值分别为 40.79%、71.60%、93.06%,之后随高度减小逐渐减小,到达地面时大气漫射透射辐照度的相对偏差绝对值分别为 0.07%、0.15%、0.24%,说明气溶胶垂直分布对到达地面的和 15 km 以上的大气漫射透射辐照度影响比较小,但在地面上方 15 km 以内气溶胶垂直分布对大气漫射透射辐照度影响非常大。

到达地面的透射强度越大。

分析了不同气溶胶标高对各高度处反射、透射强度及辐照度的影响,结果表明气溶胶垂直分布对各高度处的反射强度和反射辐照度都有影响,但在 15 km 以下影响相对较大,气溶胶标高越大,各高度层处大气反射强度和反射辐照度越小。气溶胶垂直分布对到达地面的和 15 km 以上的大气透射强度和漫射透射辐照度影响比较小;但在地面上方 15 km 以内气溶胶垂直分布对大气透射强度和漫射透射辐照度影响非常大;当气溶胶标高为 2 km 时和 0.5 km 时相比,大气透射强度和漫射透射辐照度相对偏差最大分别可达 85.69%和 93.06%。气溶胶垂直分布对大气层顶的反射比对到达地面的透射影响更大,但在地面上方 15 km 以内气溶胶垂直分布对透射的影响远大于反射。因而,在准确计算各高度层的反射辐射和地面上方 15 km 以内各高度处的透射辐射时气溶胶垂直分布是不可忽略的。

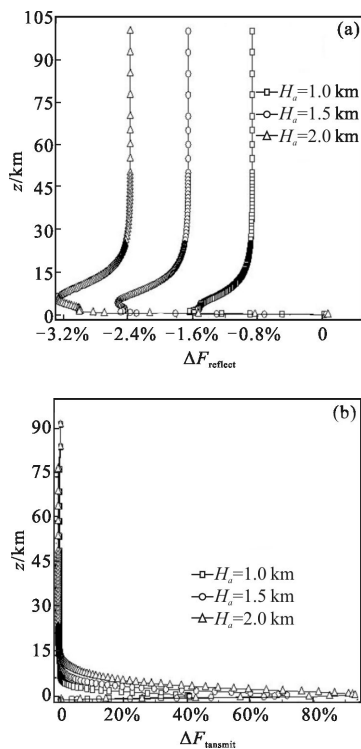


图 6 各层大气反射和漫射透射辐照度的相对偏差

Fig.6 Relative deviation of reflected and diffuse transmitted flux of each atmospheric layer

4 结论

模拟计算了不同气溶胶粒子群平均有效半径和复折射率虚部时大气层顶的反射强度和到达地面的透射强度,结果表明当太阳与观测者的相对方位角在 $30^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 时,气溶胶粒子群的平均有效半径和气溶胶粒子折射率虚部越小,大气层顶的反射强度和

参考文献:

- [1] Xu Qingshan, Wei Heli, Rao Ruizhong, et al. Simultaneous determination of aerosol optical thickness and exponent of Junge power law from satellite measurements of two near-infrared bands over the ocean [J]. *Optics Express*, 2007, 15 (8): 5227-5236.
- [2] Li Xuebin, Huang Yinbo, Xu Chidong, et al. Measurement of refractive index for aerosol particle in Xiamen [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(10): 1831-1835. (in Chinese)
李学彬, 黄印博, 徐赤东, 等. 厦门地区气溶胶折射率的测量[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10): 1831-1835.
- [3] Wei Dongjiao, Qiu Jinhuan. Wide-band method to retrieve the imaginary part of complex refractive index of atmospheric aerosols[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, 22(5): 677-685. (in Chinese)
尉东胶, 邱金桓. 大气气溶胶折射率虚部的宽谱反演方法[J]. *大气科学*, 1998, 22(5): 677-685.
- [4] Xu Kui, Liu Tao. Laser back scattering properties of aerosol [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2013, 25 (5): 108-112. (in Chinese)
徐魁, 刘涛. 气溶胶粒子的激光后向散射特性 [J]. *海军工程大学学报*, 2013, 25(5): 108-112.
- [5] Liu Xiaochen. Numerical modeling of aerosols effects on warm cloud [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological

- Science, 2006: 23–28. (in Chinese)
- 刘校辰. 气溶胶对暖云影响的数值模拟[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2006: 23–28.
- [6] Gao Taichang, Liu Lei, Li Hao. Effect of shape and character of aerosol on its near-infrared scattering characteristics [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 8(3): 302–306. (in Chinese)
- 高太长, 刘磊, 李浩. 近红外波段气溶胶粒子形状和性质对散射特性的影响 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2007, 8(3): 302–306.
- [7] Li Lifang, Zhang Jilong, Li Xiao, et al. Study of the aerosol extinction characteristics in vertical direction [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2013, 25(1): 19–23. (in Chinese)
- 李丽芳, 张记龙, 李晓, 等. 空间垂直方向气溶胶消光特性的研究[J]. 光散射学报, 2013, 25(1): 19–23.
- [8] Huang Jianping, Huang Zhongwei, Bi Jianrong, et al. Micro-pulse lidar measurements of aerosol vertical structure over the Loess Plateau [J]. *Atmospheric and oceanic science Letters*, 2008, 1(1): 8.
- [9] Gordon H R. Atmospheric correction of ocean color imagery in the Earth Observing System era [J]. *J Geophys Res-Atmos*, 1997, 102(D14): 17081–17106.
- [10] Duforet L, Frouin R, Dubuisson P. Importance and estimation of aerosol vertical structure in satellite ocean-color remote sensing[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(7): 1107–1119.
- [11] Liao H, Seinfeld J H. Radiative forcing by mineral dust aerosols: Sensitivity to key variables [J]. *J Geophys Res*, 1998, 103(24): 31637–31645.
- [12] Luo Yan, Wu Jian, Wang Weiguo. Study of the direct radiative forcing in east china with MODIS –GOCART assimilated aerosol optical depth [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2006, 22(6): 638–647. (in Chinese)
- 罗燕, 吴涧, 汪卫国. 利用 MODIS–GOCART 气溶胶资料研究中国东部地区气溶胶直接辐射强迫 [J]. 热带气象学报, 2006, 22(6): 638–647.
- [13] Meloni D, Sarra A D, Iotio T D, et al. Influence of the vertical profile of Saharan dust on the visible direct radiative forcing[J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2005, 93(4): 397–413.
- [14] Zhu A, Ramanathan V, Li F, et al. Dust plumes over the Pacific, Indian, and Atlantic oceans: Climatology and radiative impact[J]. *J Geophys Res*, 2007, 112(20): D16208.
- [15] Li C, Marufu L T, Dickerson R R, et al. In-situ measurements of trace gases and aerosol optical properties at a rural site in northern China during EAST–AIREIOP 2005 [J]. *J Geophys Res*, 2007, 112: D22S04.
- [16] Qiu Jiujuan. Effects of aerosol vertical inhomogeneity on the upwelling radiance and satellite remote sensing of surface reflectance [J]. *Advances in Atmospheric Science*, 2001, 18(4): 539–553.
- [17] Bian Jian, Qie Lili, Xu Wenqing, et al. Effect of aerosol vertical inhomogeneity on sky background brightness [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(5): 1081–1086. (in Chinese)
- 边健, 伽丽丽, 徐文清, 等. 气溶胶垂直非均一分布对天空背景亮度的影响 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(5): 1081–1086.
- [18] Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. Atmospheric physics [M]. Beijing: Peking University Press, 2003: 25–26. (in Chinese)
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 25–26.
- [19] Liao K N. An Introduction to Atmospheric Radiation [M]. 2nd ed. Guo Caili, Zhou Shijian, translated. Beijing: Meteorological Press, 2004: 281–310.
- Liao K N. 大气辐射导论 [M]. 2 版. 郭彩丽, 周诗健, 译. 北京: 气象出版社, 2004: 281–310.
- [20] Dehann J F, Bosma P B, Hovenier J W. The adding method for multiple-scattering calculations of polarized-light [J]. *Astron Astrophys*, 1987, 183(2): 371–391.
- [21] Li Jingzhen. Optical Manual [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Publishing House, 2010: 1753. (in Chinese)
- 李景镇. 光学手册 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2010: 1753.