

# 灰霾组分的多角度偏振反射特性模拟

王中挺<sup>1,2</sup> 陈良富<sup>2</sup> 厉青<sup>1</sup> 李莘莘<sup>2</sup> 尚华哲<sup>2</sup> 陈辉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094

<sup>2</sup>中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

**摘要** 基于气溶胶和云光学特性库(OPAC)以及灰霾的地基研究结果,研究了水溶型(WASO)、黑碳型(BC)、沙尘型(DUST)及伴随雾云生消产生的亚微米细粒子(SubM)4种类型的灰霾组分。利用米氏理论计算了各组分的消光系数、散射相函数、偏振相函数等光学特性,并分析了相对湿度(RH)对水溶型粒子光学特性的影响,利用辐射传输(RT3)模拟了卫星观测到的各灰霾组分多角度标量和偏振信号。结果表明:在大部分卫星观测角度,WASO和SubM的标量信号较强,而BC和WASO的偏振信号较强;随着RH的增加,WASO粒子的消光系数有着较大的增长,而散射相函数和偏振相函数则随之整体减小,这种变化主要是由于粒子半径吸湿增大引起的。因此,为实现灰霾的遥感反演,需结合多角度偏振和标量观测信号。

**关键词** 大气光学; 灰霾; 遥感; 多角度偏振; 模拟; 相对湿度

中图分类号 X831

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0901002

## Simulation of Multi-Angle Polarized Reflectance of Haze

Wang Zhongting<sup>1,2</sup> Chen Liangfu<sup>2</sup> Li Qing<sup>1</sup> Li Shenshen<sup>2</sup> Shang Huazhe<sup>2</sup> Chen Hui<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Satellite Environment Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract** Based on optical properties of aerosols and clouds (OPAC) and ground-based measurements, four typical haze components included water soluble (WASO), soot (BC), dust (DUST) and sub-micron (SubM) components. By Mie theory, their extinction, scattering phase function, polarized phase function are calculated, and for water soluble particle, these parameters are calculated in different relative humidities (RHs). Then, multi-angle intensity and polarized signals, which are received by the satellite, are simulated for these haze components by RT3 (radiative transfer 3). The results show that scalar signal intensities of WASO and SubM are larger than others in most satellite observation angles, while polarized signal intensities of BC and WASO are obviously larger than the others. As the increasing of RH, the extinction of WASO will increase while scattering and polarized phase function will decrease entirely, and the main reason is the hygroscopic growth of particle radius. So, for remote sensing inversion of haze, multi-angle polarized measurements will be assisted by multi-angle intensity measurements.

**Key words** atmospheric optics; haze; remote sensing; multi-angle polarized; simulation; relative humidity

**OCIS codes** 010.1100; 280.1100; 280.4991; 290.4020; 290.5855

## 1 引言

灰霾主要是指悬浮在大气中的大量微小尘粒、烟粒或盐粒的集合体,使大气水平能见度降低到5 km以下的现象<sup>[1]</sup>。近年来,我国的灰霾污染频繁出现,呈现出区域复合污染的特征,尤其在“京津冀”、“长三角”、“珠三

收稿日期: 2015-02-05; 收到修改稿日期: 2015-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(41301358)、国家重点实验室开放基金课题(OFSLRSS201301)、高分辨率对地观测系统重大专项(05-Y30B02-9001-13/15)、国家环境保护公益性行业科研专项(201309011)

作者简介: 王中挺(1980—),男,博士,高级工程师,主要从事大气遥感方面的研究。E-mail: wzt\_07@126.com

角”等城市群表现更为明显,严重影响了区域环境空气质量,对人民群众的身体健康构成威胁,引起了国内外广泛关注。尤其是在2013年1月,我国东部地区出现了大范围持续性的灰霾污染,京津冀地区出现了5次强霾污染,北京、天津、石家庄等城市PM2.5小时均值超过500 μg/m<sup>3</sup>,大部分城市的空气超标天数超过了20天<sup>[2]</sup>。

针对我国日益严重的灰霾现象,已有许多学者通过地基观测的方式,对灰霾的物理化学组分、光学特性等方面展开了研究<sup>[3-4]</sup>,同时也采用气象地理分析、气溶胶粒子转化、模式模拟等方法开展了成因分析<sup>[5-7]</sup>。利用卫星遥感方法能够快速、直观的获取灰霾的大范围分布状况<sup>[8-11]</sup>,但在遥感反演中,由于灰霾组分的物理、光学特性各有异同,而且吸湿后也有较大变化,使反演结果有较大的不确定性。利用辐射传输模式模拟典型地气系统的卫星观测信号,分析其对观测目标(云、气溶胶等)的敏感性<sup>[12-17]</sup>,模拟相对湿度(RH)对气溶胶粒子光学特性的影响<sup>[18-20]</sup>,能对卫星反演有较好的改进。

本文在地基观测灰霾组分结果基础上,分析了水溶型(WASO)、黑碳型(BC)、沙尘型(DUST)、亚微米粒子(SubM)等灰霾组分的消光系数、散射相函数、偏振相函数等光学性质,重点分析了相对湿度对水溶型粒子光学特性的影响,模拟了卫星观测的灰霾组分标量、偏振信号的多角度分布,分析了多角度偏振观测方式在灰霾遥感中的适用性。

## 2 辐射传输模型简介

在研究大气辐射传输过程中,假设大气为平面平行,得到矢量辐射传输方程为<sup>[21]</sup>

$$\mu \frac{dI(\tau, \mu, \phi)}{d\tau} = -I(\tau, \mu, \phi) + \frac{\omega}{4\pi} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 M(\tau, \mu, \phi; \mu', \phi') I(\tau, \mu', \phi') d\mu' d\phi' - \frac{\omega}{4\pi} F_0 \exp(-\tau/\mu_0) M(\tau, \mu, \phi; \mu_0, \phi_0) [1, 0, 0, 0]^T, \quad (1)$$

式中 $\tau$ 表示大气光学厚度, $I$ 为Stokes参量所构成的矢量, $M$ 为大气粒子散射矩阵, $\omega$ 是单次散射反照率, $F_0$ 是大气层顶的太阳辐照度, $[1, 0, 0, 0]^T$ 表示太阳入射光为非偏振光, $\mu$ 表示观测天顶角的余弦, $\phi$ 表示观测方位角, $\mu_0$ 表示太阳天顶角的余弦, $\phi_0$ 表示太阳方位角。

本文采用倍加累加法<sup>[22]</sup>求解矢量辐射传输方程,进行辐射传输计算,模拟卫星观测的信号。主要是将大气划分为不同的层,将每层进行多次等分划分为多个薄层,利用倍加法连续叠加薄层得到该层的反射矩阵、透射矩阵和源矢量,然后利用累加法计算两层之间的连续反射过程,得到组合层的辐射和透射性质,最后得到整层大气的反射信号。

## 3 灰霾粒子偏振散射特性研究

地面观测结果表明<sup>[23-25]</sup>,在灰霾污染时,水溶型粒子占灰霾光学厚度的主要部分(大于70%),而沙尘型、黑碳型粒子也不可忽略。Li等<sup>[26]</sup>研究表明,在灰霾严重污染时,由于雾、云的生消,大气中存在着一个特异性的亚微米细粒子模态。本文利用米氏散射程序从这4种不同粒子群的物理性质(见表1,其中水溶型粒子暂采用50%相对湿度下的物理性质,其随相对湿度变化在下文具体讨论,Real part和Image part指复折射指数的实部和虚部)计算其消光系数、散射系数、散射相函数、偏振相函数等光学性质以考察多角度观测信号(尤其是多角度偏振信号)对灰霾污染下各类气溶胶的敏感性。本文采用的沙尘型、水溶型、黑碳型粒子的物理性质从气溶胶和与云光学特性库(OPAC)<sup>[27]</sup>获取。谱分布函数采用单对数正态分布的形式:

$$n(r) = \frac{C}{r\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_m)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (2)$$

式中 $C$ 是归一化粒子数常数, $\sigma$ 是标准偏差, $r_m$ 是平均半径。

表1 865 nm波段灰霾污染下各灰霾粒子物理性质  
Table 1 Physical properties of typical haze particles in 865 nm

	Real part	Image part	Mean radius	Standard deviation
DUST	1.52	-0.01	0.47	0.92
BC	1.75	-0.43	0.01	0.69
WASO	1.43	-0.01	0.03	0.81
SubM	1.33	0.00	0.44	0.40

### 3.1 各典型粒子散射特征

1) 散射相函数。各灰霾粒子的散射相函数如图 1(a)所示,可以看出,沙尘型由于强烈的前向散射,在散射角较小时散射相函数远远大于其他 3 个。在 80°~140°之间,黑碳型的散射最高,水溶型次之,沙尘型和亚微米粒子最低。在散射角大于 140°时,沙尘型散射又逐渐增加,最终接近黑碳型。

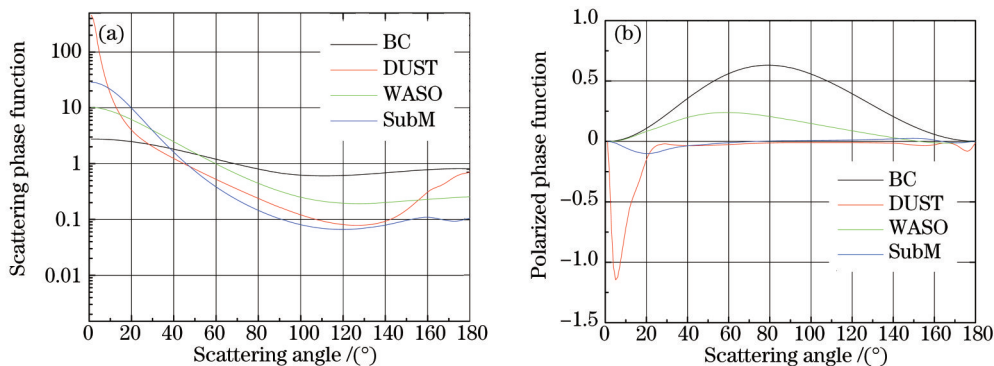


图 1 各灰霾粒子的(a) 散射相函数和(b)偏振相函数

Fig.1 (a) Scattering phase function and (b) polarized phase function of haze particles

2) 偏振相函数。各灰霾粒子的偏振相函数如图 1(b)所示,可以看出,由于偏振信号对粗粒子不敏感,沙尘型和亚微米粒子除了在散射角较小(小于 40°)或较大(大于 160°)时其偏振相函数远远小于黑碳型和水溶型粒子。黑碳型和水溶型粒子的偏振相函数分别在 80°和 60°左右达到最大。

3) 随波长增加的偏振相函数和散射相函数。散射角为 100°时灰霾粒子的偏振相函数和散射相函数随波长的变化如图 2 所示,可以看出,黑碳型的散射相函数和偏振相函数最大,水溶型次之,沙尘型和亚微米粒子散射相函数较小但也有贡献,偏振相函数则接近于 0,可以忽略不计。随着波长的增加,黑碳型有较大的增加,其他类型则变化不大。

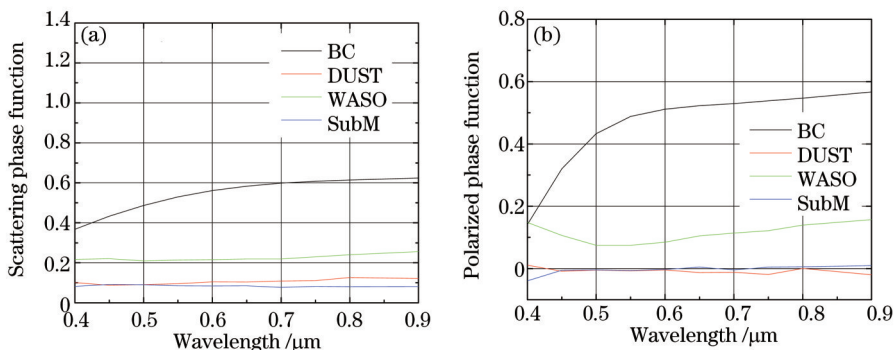


图 2 随波长变化的灰霾粒子的(a) 散射相函数和(b) 偏振相函数

Fig.2 (a) Scattering phase function and (b) polarized phase function of haze particles versus wavelength

因此,在灰霾天气下,黑碳型和水溶型粒子的标量和偏振散射较强,而沙尘型和亚微米粒子的标量散射较小,偏振散射可以忽略不计;随着波长的增加,黑碳型和水溶型散射明显增加,而沙尘型和亚微米粒子则变化不大。

### 3.2 相对湿度的影响

水溶型粒子受到相对湿度的影响,其物理性质会发生改变,进而使其光学特性发生改变。OPAC 提供了从 0~100%变化的水溶型粒子物理性质(复折射指数实部、虚部以及谱分布函数的平均半径,方差设定为不变),据此利用米氏理论计算了粒子的消光系数、散射相函数和偏振相函数的变化。865 nm 消光和散射系数随相对湿度变化如图 3 所示,可以看出,随着相对湿度的增加,水溶型的消光和散射都随之增加,在相对湿度大于 80%后有了急剧的增加。图 4 为不同相对湿度条件下的偏振相函数和散射相函数。可以看出,随着相对湿度的增加,在散射角为 80°~140°之间时,水溶型粒子的标量散射有较明显的减小,偏振散射同样也有较明显的减小。

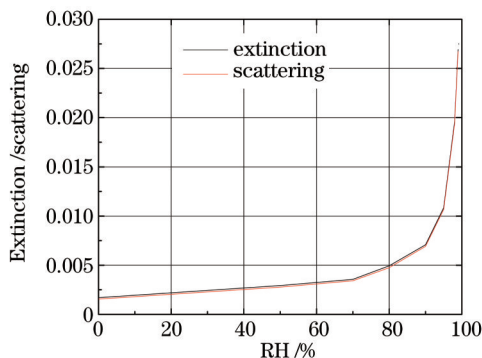


图 3 865 nm 消光和散射系数随相对湿度变化

Fig.3 Extinction and scattering versus relative humidity in 865 nm

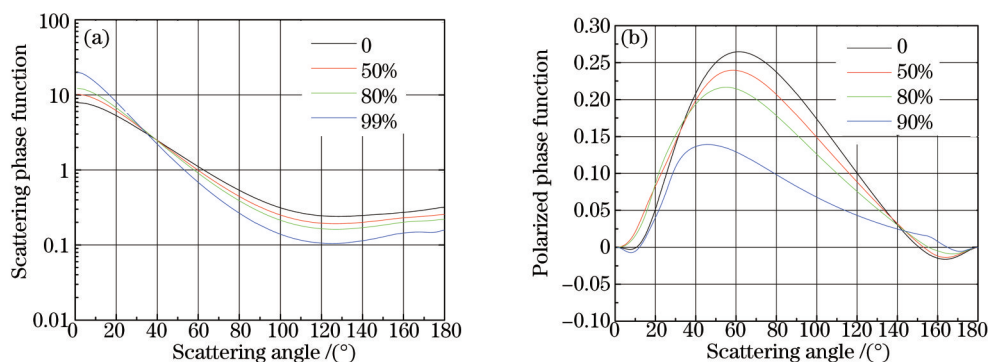


图 4 随相对湿度变化的水溶型粒子 (a) 散射相函数和(b)偏振相函数

Fig.4 (a) Scattering phase function and (b) polarized phase function of water soluble particles in different relative humidities

为考察不同物理性质的变化对消光的影响,分别只让复折射指数实部、虚部以及谱分布函数的平均半径随相对湿度变化,其他参量设置为相对湿度为0的值。水溶型粒子物理性质吸湿变化对消光系数的影响如图5所示,可以看出,随着相对湿度的增加,水溶型粒子吸湿使其复折射指数实部接近于水,会使其消光系数逐渐降低;复折射指数虚部变化带来的影响不大;吸湿带来的粒子半径增大会大大增强粒子的消光。水溶型粒子物理性质吸湿变化对散射相函数和偏振相函数的影响如图6所示,可以看出,在卫星观测角度里(60°~180°之间,仅选取散射角为100°的情况,其他角度类似),随着相对湿度的增加,复折射指数实部会使其标量反射逐渐增加;复折射指数虚部变化带来的影响不大;而吸湿带来的粒子半径增大则会大大减小粒子的反射。而对于偏振反射,复折射指数虚部变化带来的影响同样不大,复折射指数实部和粒子半径增大会使其偏振散射逐渐降低,粒子半径影响最为明显。

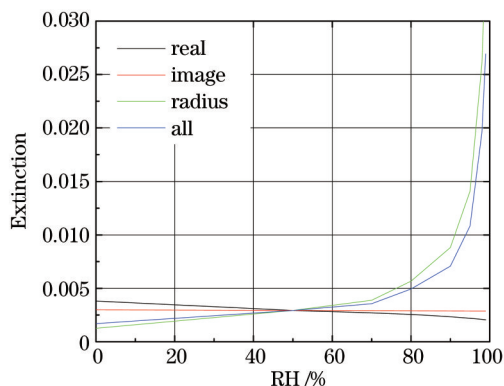


图 5 水溶型粒子物理性质吸湿变化对消光系数的影响

Fig.5 Extinction of water soluble particles whose physical properties separately versus relative humidity

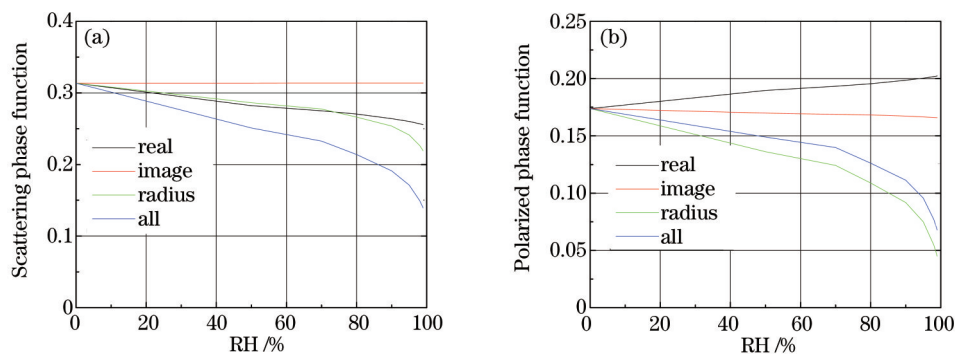


图6 水溶型粒子物理性质吸湿变化对(a)散射相函数和(b)偏振相函数的影响  
 Fig.6 (a) Scattering phase function and (b) polarized phase function of water soluble particles whose physical properties separately versus relative humidity

### 4 卫星观测的灰霾粒子反射特性

卫星接收的信号,除了气溶胶/灰霾粒子的散射特性外,还包含大气分子、地表的贡献和地-气系统的多次散射,本文在上面计算的各灰霾组分光学特性的基础上,采用辐射传输(RT3)进行辐射传输计算,以模拟不同大气条件下卫星观测到的信号。地表类型设为裸土,大气分子设置为标准大气压下的状况。

#### 4.1 随散射角度变化

设定太阳天顶角为 $30^\circ$ ,相对方位角为 $0^\circ$ ,观测天顶角从 $0^\circ \sim 66^\circ$ 变化,模拟灰霾污染条件下的卫星观测信号的角度变化。模拟中粒子群光学厚度统一设置为1.5(550 nm)。灰霾粒子的表观反射率随散射角的变化如图7(a)所示,可以看出,对于卫星观测的标量信号,水溶型和亚微米粒子反射最强,随着散射角的增加缓慢减小;黑碳型由于其对光的强烈吸收,表观反射率最低;沙尘型气溶胶由于前向散射较强,表观反射率较低。灰霾粒子的偏振反射角的变化如图7(b)所示,可以看出,水溶型和黑碳型偏振反射最强,偏振反射率随着散射角的增加迅速减小,在 $140^\circ$ 后各组分偏振反射已较为接近。

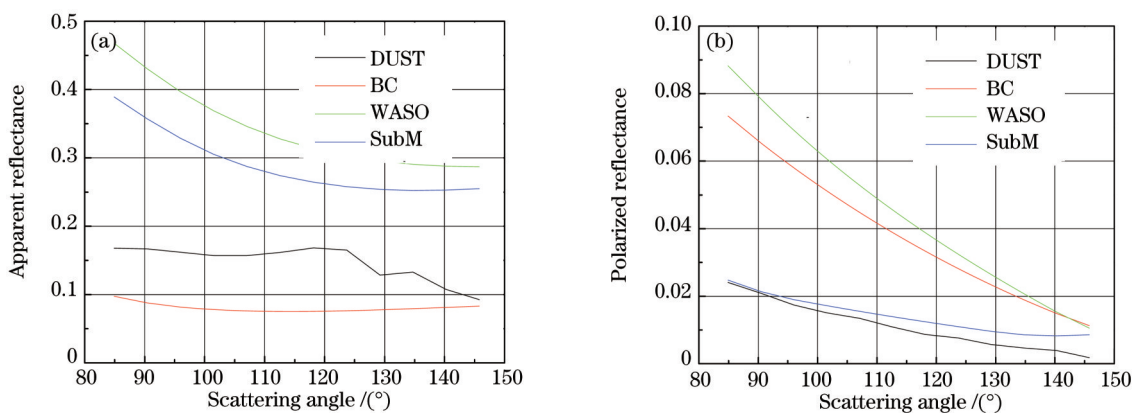


图7 灰霾粒子的(a)表观反射率和(b)偏振反射率随散射角变化

Fig.7 (a) Apparent reflectance and (b) polarized reflectance of haze particles versus scattering angle

#### 4.2 随光学厚度变化

为考察灰霾污染条件下,卫星观测信号对各组分粒子浓度的敏感性,利用RT3模拟了散射角为 $100^\circ$ 时的表观反射率和偏振反射率随光学厚度(OD)的变化,结果如图8所示。从图8(a)可以看出,在650 nm波段,水溶型和亚微米粒子的表观反射率,随光学厚度增加有较明显的增高,沙尘型和黑碳型变化不大;从图8(b)可以看出,在865 nm波段,亚微米粒子对标量信号有较强的敏感性,而水溶性粒子由于地表反射的影响,变化较小;从图8(c)和图8(d)可以看出,水溶型和黑碳型偏振反射较强,且光学厚度对卫星观测信号有较强的敏感性,沙尘型和亚微米偏振反射较小,且光学厚度对卫星观测信号的敏感性小。

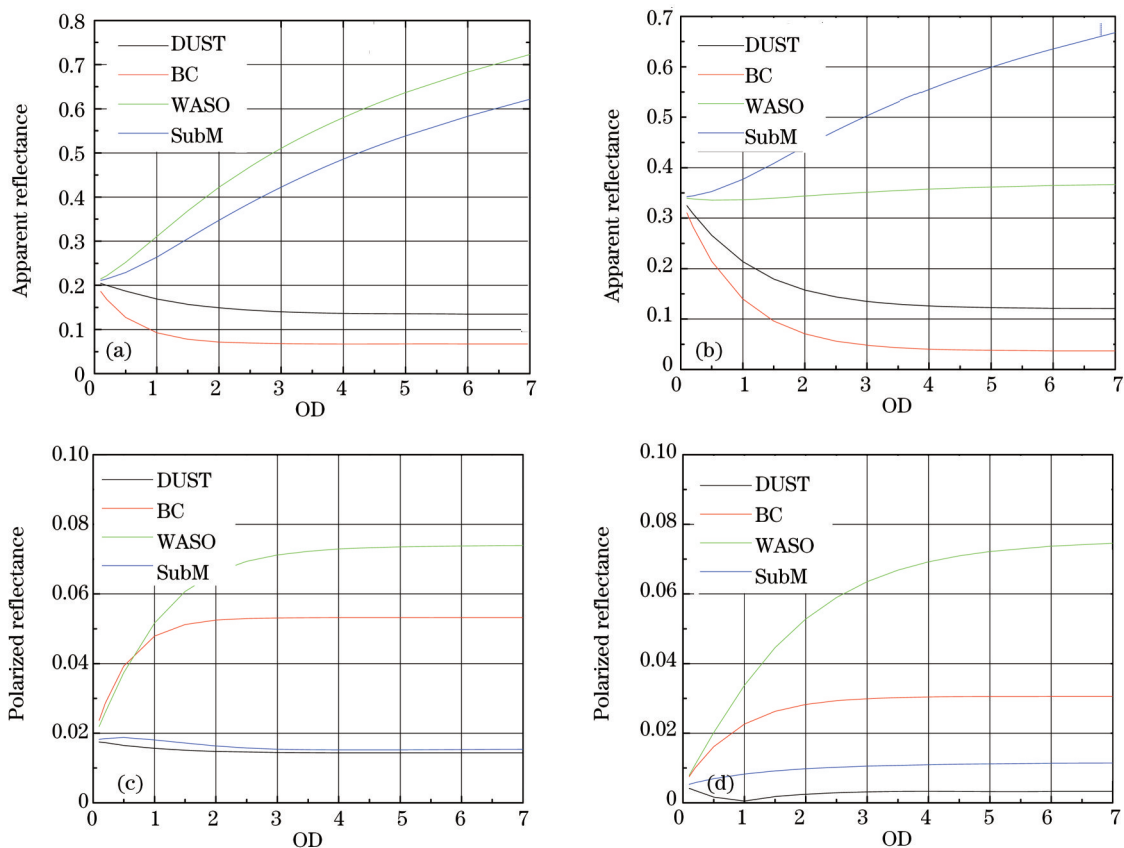


图8 模拟的卫星观测信号随OD变化图。(a) 650 nm 反射率; (b) 865 nm 反射率; (c) 650 nm 偏振反射率; (d) 865 nm 偏振反射率  
Fig.8 Simulated satellite signal versus OD. Apparent reflectance in (a) 650 nm and (b) 865 nm; polarized reflectance in (c) 650 nm and (d) 865 nm

### 4.3 相对湿度的影响

图9模拟了散射角为 $100^\circ$ 时水溶型粒子复折射指数和谱分布函数吸湿变化对卫星观测到的信号的影响,可以看出,随着相对湿度的增长,卫星观测到的标量和偏振反射率都有明显的增长,标量反射率增长更为明显,该增长主要由水溶型粒子吸湿带来的粒子半径增大造成,而复折射指数虚部的吸湿降低对卫星观测信号影响不大。

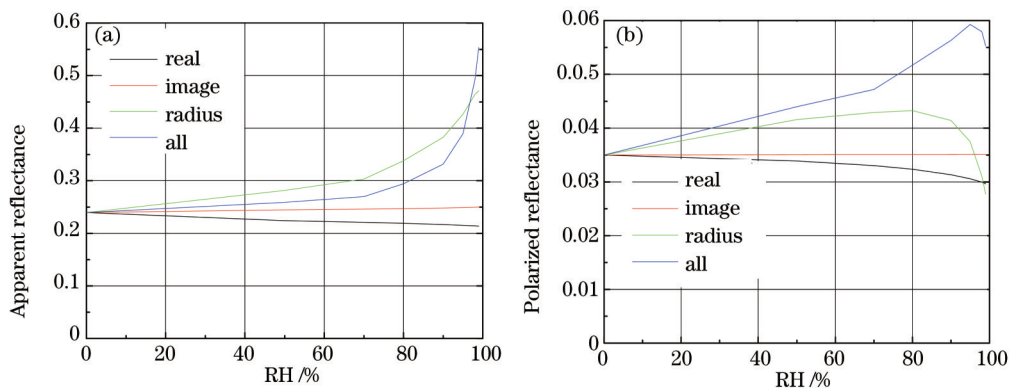


图9 水溶型粒子物理性质吸湿变化对(a) 表现反射率和(b) 偏振反射率的影响

Fig.9 (a) Apparent and (b) polarized reflectance of water soluble particles whose physical properties separately versus RH

### 4.4 植被地表对反射信号的影响

在上述模拟中,地表类型统一设置为裸土,而实际上,许多陆地地表也为植被所覆盖。本节模拟了散射角为 $100^\circ$ 时在865 nm波段各灰霾组分的植被地表表现反射率与偏振反射率(图10)以分析其与裸土地表(图8)的不同。可以看出,由于近红外波段的植被强烈反射,在光学厚度较小时,灰霾各组分的表现反射率较高;

随着光学厚度的增加,逐渐接近裸土地表的表现反射率,亚微米粒子表现反射率随之增加,沙尘型和黑碳型随之降低,但水溶型反射率与裸土地表相反,随光学厚度增加而降低。由于地表偏振反射的贡献较小,植被与裸土的偏振反射率基本相同。

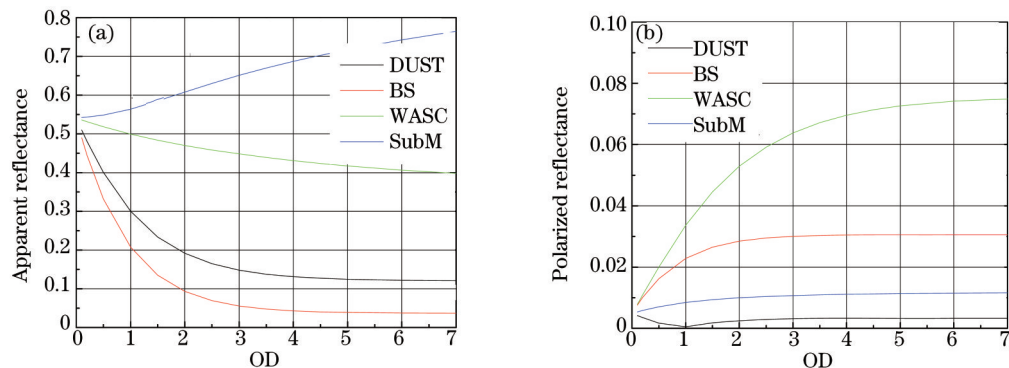


图 10 模拟的植被地表卫星观测信号随 OD 变化图。(a) 865 nm 波段反射率; (b) 865 nm 波段偏振反射率

Fig.10 Simulated satellite signal versus OD over vegetation surface. (a) Apparent reflectance in 865 nm; (b) polarized reflectance in 865 nm

#### 4.5 各灰霾组分混合后的粒子反射特性

本节模拟了卫星观测的各灰霾组分的反射特性,而地面观测表明<sup>[23-24]</sup>,灰霾由水溶型、黑碳型、沙尘型等灰霾组分混合而成,其谱分布函数需要用双对数正态分布或三对数正态分布甚至多对数正态表示。根据本文的灰霾组分设置,谱分布函数设置为沙尘型、黑碳型、水溶型三对数正态分布(亚微米细粒子模态需要雾、云的生消产生)。

$$n(r) = \sum_{i=1}^3 \frac{C_i}{r\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_m)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (3)$$

式中  $i$  指灰霾的第  $i$  个组分。

散射角为  $100^\circ$  时在 865 nm 波段各灰霾组分混合后的粒子表现反射率与偏振反射率如图 11 所示。结合地面观测结果<sup>[23]</sup>,在 550 nm 各组分光学厚度比例设置为沙尘型:20%,黑碳型:10%,水溶型:70%,其中,水溶型相对湿度为 50%。可以看出,由于沙尘型和黑碳型粒子的影响,表现反射率随光学厚度的增加缓慢下降,而偏振反射率受水溶型和黑碳型影响较大,随光学厚度的增加迅速上升。在光学厚度较大时,偏振信号能更好的区分灰霾的轻重程度。

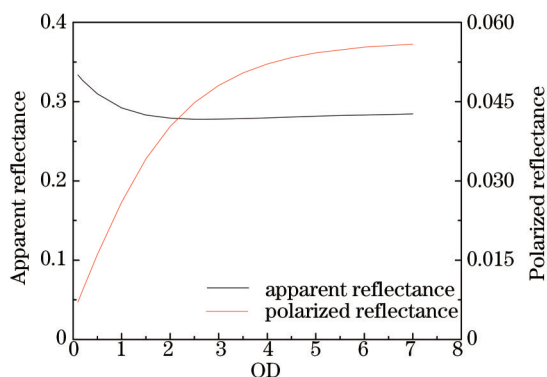


图 11 DUST, BC 和 WASO 组分混合后的表现反射率和偏振反射率随 OD 变化

Fig.11 Apparent reflectance and polarized reflectance versus OD for haze mixed with DUST, BC and WASO

## 5 结 论

通过对灰霾的水溶型、黑碳型、沙尘型、亚微米粒子等各个组分的散射特征分析结合卫星观测信号,得到如下结论:

- 1) 在卫星观测角度内(散射角在  $40^\circ \sim 160^\circ$  之间),随着散射角的增加,各组分的标量反射率和偏振反射率

都随之减小；

2) 在大部分卫星观测角度,水溶型和亚微米粒子的标量信号较强,而黑碳型和水溶型的偏振信号较强；

3) 随着光学厚度的增大,水溶型和亚微米粒子的标量信号有明显的增长,水溶型和黑碳型的偏振信号也有明显的增长(865 nm 波段),而黑碳型的偏振信号在光学厚度较大(大于2)时的增长不明显；

4) 随着相对湿度的增加,水溶型粒子的消光系数有着较大的增长(尤其在80%之后),而散射相函数和偏振相函数则随之整体减小,这种变化主要是由水溶型粒子平均半径吸湿增大引起的；

5) 在相对湿度较高(大于90%)时,水溶型粒子的偏振反射率随着相对湿度的增加反而有所下降；

6) 地表类型的不同对表观反射率影响较大,而对偏振反射率几乎无影响；

7) 在光学厚度较大时,偏振信号能更好的区分灰霾的轻重程度。

综上所述,灰霾的各组分粒子对标量和偏振信号的响应各有异同,且随散射角、光学厚度、相对湿度、波段等有较大变化。利用多角度偏振观测信号,结合多角度标量信号,同时辅以相对湿度等辅助数据,才能更好的实现灰霾及其组分信息的遥感监测。

### 参 考 文 献

- 1 World Meteorological Organization. Aerodrome Reports and Forecasts: A User's Handbook to the Codes[M]. Geneva: World Meteorological Organization, 2005: 72.
- 2 Wang Y S, Yao L, Wang L L, *et al.*. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(1): 14–25.
- 3 Chang Qing, Yang Fumo, Li Xinghua, *et al.*. Characteristics of mass and chemical species size distributions of particulate matter during haze pollution in the winter in Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(2): 363–370.  
常 清, 杨复沫, 李兴华, 等. 北京冬季雾霾天气下颗粒物及其化学组分的粒径分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(2): 363–370.
- 4 Yang Weifen, Yin Yan, Wei Yuxiang, *et al.*. Characteristics and sources of metal elements in PM 2.5 during hazy days in Nanjing[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(1): 12–17.  
杨卫芬, 银 燕, 魏玉香, 等. 霾天气下南京PM2.5中金属元素污染特征及来源分析[J]. *中国环境科学* 2010, 30(1): 12–17.
- 5 Zhang R H, Li Q, Zhang R N. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(1): 26–35.
- 6 Wang Z F, Li J, Wang Z, *et al.*. Modeling study of regional severe hazes over mid-eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevention and control[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(1): 3–13.
- 7 Wu Dui, Deng Xuejiao, Bi Xueyan, *et al.*. Study on the visibility reduction caused by atmospheric haze in Guangzhou area [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2007, 23(1): 1–6。  
吴 兑, 邓雪娇, 毕雪岩, 等. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降[J]. *热带气象学报*, 2007, 23(1): 1–6.
- 8 Li S, Chen L, Xiong X, *et al.*. Retrieval of the haze optical thickness in north China plain using MODIS data[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2013, 51(5): 2528–2540.
- 9 Li Zhengqiang, Xu Hua, Zhang Ying, *et al.*. Joint use of active and passive remote sensing for monitoring of severe haze pollution in Beijing 2013[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(4): 919–928.  
李正强, 许 华, 张 莹, 等. 北京区域2013严重灰霾污染的主被动遥感监测[J]. *遥感学报*, 2013, 17(4): 919–928.
- 10 Minghui Tao, Liangfu Chen, Lin Su, *et al.*. Satellite observation of regional haze pollution over the North China Plain[J]. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 2012, 117 (D12): D12203.
- 11 Wang Zhongting, Li Qing, Li Shenshen, *et al.*. The monitoring of haze from HJ-1[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32 (3): 775–780  
王中挺, 厉 青, 李莘莘, 等. 基于环境一号卫星的霾监测应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(3): 775–780.
- 12 Cheng T, Gu X, Wu Y, *et al.*. The optical properties of absorbing aerosols with fractal soot aggregates: Implications for aerosol remote sensing[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 125: 93–104.
- 13 Cheng T, Gu X, Wu Y, *et al.*. Effects of atmospheric water on the optical properties of soot aerosols with different mixing states[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, 147: 196–206.
- 14 Fan Meng, Chen Liangfu, Li Shenshen, *et al.*. Scattering properties of non-spherical particles in the CO<sub>2</sub> shortwave infrared band[J].



- Acta Physica Sinica, 2012, 61(20): 204202.
- 范 萌, 陈良富, 李莘莘, 等. 非球形气溶胶粒子短波红外散射特性研究[J]. 物理学报, 2012, 61(20): 204202.
- 15 Cheng Tianhai, Gu Xingfa, Chen Liangfu, *et al.*. Multi-angular polarized characteristics of cirrus clouds[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(8): 5323–5332.
- 程天海, 顾行发, 陈良富, 等. 卷云多角度偏振特性研究[J]. 物理学报, 2008, 57(8): 5323–5332.
- 16 Huang Honglian, Yi Weining, Qiao Yanli, *et al.*. Analyzing of optical remote polarization imaging simulation based on intensity images and surface polarized bidirectional reflectance data[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1028001.
- 黄红莲, 易维宁, 乔延利, 等. 基于强度图像和地物偏振反射率数据的光学遥感偏振成像仿真分析[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1028001.
- 17 Huang Chaojun, Wu Zhensen, Liu Yafeng, *et al.*. Numerical calculation of optical properties of multi-particle size aerosol aggregate particle[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0601004.
- 黄朝军, 吴振森, 刘亚锋, 等. 多粒径气溶胶凝聚粒子光学特性的数值计算[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0601004.
- 18 Cai Jia, Gao Jun, Fan Zhiguo, *et al.*. The polarization characteristic feresearch of aerosol particles under the humidity influence[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2013, 34(5): 639–644.
- 蔡 嘉, 高 隽, 范之国, 等. 湿度影响下的气溶胶粒子的偏振特性[J]. 发光学报, 2013, 34(5): 639–644.
- 19 Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu, *et al.*. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0101002.
- 郝增周, 龚 芳, 潘德炉, 等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0101002.
- 20 Xu Bo, Huang Yinbo, Fan Chengyu, *et al.*. Calculation of equivalent absorption coefficient of uniformly mixed hygroscopic aerosol particles[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0101001.
- 徐 博, 黄印博, 范承玉, 等. 吸湿性均匀混合气溶胶粒子等效吸收系数计算分析[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0101001.
- 21 Liou K N. An Introduction to Atmospheric Radiation (Second Edition)[M]. San Diego: Academic Press, 2002.
- 22 Evans K F, Stephens G L. A new polarized atmospheric radiative transfer model[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1991, 46(5): 413–423.
- 23 Wei Peng, Li Zhengqiang, Wang Yan, *et al.*. Remote sensing estimation of aerosol composition and radiative effects in haze days[J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(4): 1021–1031.
- 魏 鹏, 李正强, 王 堰, 等. 灰霾污染状况下气溶胶组分及辐射效应的遥感估算[J]. 遥感学报, 2013, 17(4): 1021–1031.
- 24 Z Q Li, X Gu, L Wang, *et al.*. Aerosol physical and chemical properties retrieved from ground-based remote sensing measurements during heavy haze days in Beijing winter[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13: 10171–10183.
- 25 Wang Ling, Li Zhengqiang, Li Donghui, *et al.*. Retrieval of dust fraction of atmospheric aerosols based on spectra characteristics of refractive indices obtained from remote sensing measurements[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(6): 1644–1649.
- 王 玲, 李正强, 李东辉, 等. 基于遥观测的折射指数光谱特性反演大气气溶胶中沙尘组分含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(6): 1644–1649.
- 26 Li Z Q, Eck T, Zhang Y, Zhang Y H, *et al.*. Observations of residual submicron fine aerosol particles related to cloud and fog processing during a major pollution event in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2014, 86: 187–192.
- 27 Hess M, Koepke P, Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(5): 831–844.

栏目编辑: 史 敏