

文章编号: 0253-2239(2008)12-2420-07

海雾的遥感光学辐射特性

郝增周 潘德炉 龚 芳 朱乾坤

(国家海洋局第二海洋研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要 为实现海雾的卫星自动监测,利用大量 AVHRR3/NOAA17 卫星观测数据,比较不同目标物(海雾区、不同云系及晴空下垫面)在可见光、近红外波段的反射辐射特性差异,统计分析了海雾的遥感光学辐射特性。结果表明,海雾区三通道反射率满足 $R_{\text{Ch1}} > R_{\text{Ch3a}} > R_{\text{Ch2}}$,甚至出现 $R_{\text{Ch3a}} > R_{\text{Ch1}} > R_{\text{Ch2}}$,不同于其它目标物($R_{\text{Ch1}} > R_{\text{Ch2}} > R_{\text{Ch3a}}$)。运用 Streamer 辐射传输模式模拟了海雾、不同云系在卫星高度处的三通道反射率特性,从理论上进一步验证了海雾所具有的光学辐射特性,同时指出,Ch3a 的反射率对粒子粒径的响应明显,即粒子粒径越小,Ch3a 的反射率越高。通过米氏散射理论对这一现象进行原因分析。

关键词 遥感; 光学辐射特性; 光谱分析; 辐射模拟; 海雾

中图分类号 P407.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082812.2420

Optical Radiance Characteristics of Sea Fog Based on Remote Sensing

Hao Zengzhou Pan Delu Gong Fang Zhu Qiankun

(State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou, Zhejiang 310012, China)

Abstract For sea fog events auto-monitor from satellites, the visible and infrared spectral radiance characteristics of sea fog, water surface, and cloud regions are analyzed based on data analysis from AVHRR3/NOAA17 observations. The remote-sensing optical radiance characteristics of sea fog are analyzed. It is found that there exists obvious spectral difference between sea fog and others. In sea fog region, the satellite-measured reflectance relation of channel 3a (1.58~1.64 μm), channel 1 (0.58~0.68 μm) and channel 2 (0.725~1.0 μm), is $R_{\text{Ch1}} > R_{\text{Ch3a}} > R_{\text{Ch2}}$ and even $R_{\text{Ch3a}} > R_{\text{Ch1}} > R_{\text{Ch2}}$, which are different from the $R_{\text{Ch1}} > R_{\text{Ch2}} > R_{\text{Ch3a}}$ of ocean and some cloud bodies. With the Streamer radiative transfer model, the fog and clouds spectral properties of AVHRR3 Channel 1, 2 and 3a are simulated under different fog/cloud microphysical and observational conditions. The simulations are consistent with observations. The reflectance of Channel 3a is affected by the size of particle, that is, the smaller is the size, the higher reflectance is. Finally, those fog and cloud spectral properties are explained with Mie scattering theory.

Key words remote sensing; optical radiance characteristics; spectral analyses; radiative simulation; sea fog

1 引 言

大量微小水滴浮游空中,常呈乳白色,使水平能见度小于 1.0 km 时,记为雾^[1]。特别地,海雾是发生在海洋上大气边界底层中的水汽凝结现象,垂直高度通常在 200~500 m^[2]。海雾发生给船只航行、渔业生产、沿岸居民生活及军事活动带来严重的影响,常引发灾难性的事故。所以,准确地监测海雾发

生区域分布具有重要意义。然而,现有沿海、岛屿测站的观测频率和观测密度十分有限,致使这些常规监测在无人居住的海洋难以实现,尤其是大范围的监测。随着遥感技术的发展,传感器分辨率的提高,卫星遥感作为一个稳定的监测平台,具有快速、近实时、大面积连续观测的优点,成为监测大雾事件的有效手段^[3,4]。

收稿日期: 2008-03-10; 收到修改稿日期: 2008-06-05

基金项目: 卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放研究基金(200509)和国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项(JB0705)资助课题。

作者简介: 郝增周(1980—),男,博士后,主要从事海洋、大气环境参数遥感方面的研究。E-mail: hzyx80@163.com

海雾遥感辐射特性的分析是卫星监测海雾的基础。20 世纪 70 年代初, Hunt^[5]从理论上分析了小粒径不透明水云在中红外和远红外波段存在不同的发射率,引起通道间亮温差异。Eyre 等^[6]根据这一特性利用 NOAA 卫星上 3.7 μm 和 11 μm 的亮温差进行夜间雾和低层云尝试性的识别工作。此后很多研究者针对不同的卫星传感器发展了这种方法,即目前唯一用于业务化夜晚雾监测的方法“双通道差值法”^[7~11]。但是白天雾监测还没有形成统一的方法,许多国内外科研人员通过分析云雾的光谱和红外特征、图像纹理结构等,说明了通道组合阈值判断在大雾检测方面具有很大的潜力^[12~16]。近几年,随着 MODIS 数据的推广应用,利用多光谱 MODIS 数据遥感监测大雾的研究越来越多。Bendix 利用辐射传输方程计算 MODIS 通道 1-7 上最大和最小的雾反射率,以此为域值对白天陆地雾进行监测^[17]。马慧云等^[18]利用 MODIS 卫星数据,对大雾和其它目标物分别采样,进行光谱分析,选择了利于白天和夜晚平流雾监测的波段,采用阈值法对平流雾进行监测。邓军等^[19]用 SBDART 辐射传输模式模拟 MODIS 通道 1、6、20、31 的云雾光谱辐射特性,提出了一种多通道阈值法来实现白天大雾的监测。

尽管海雾的卫星遥感监测研究已经取得若干结果,但监测研究大多集中于个例分析,通道组合及阈值选择成为海雾监测成败的因素。本文利用大量 AVHRR3 卫星数据,分析统计了海雾区和其它地物的通道辐射特性;通过 Streamer 辐射传输模式模拟数据对观测结论进行验证和再分析,指出结论的一般性;最后通过米氏(Mie)散射理论简要地进行了原因分析,为卫星遥感数据在海雾监测中的开发及应用提供了科学基础。

2 数据和模式简介

本文所用数据是国家海洋局第二海洋研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室地面站提供的 AVHRR3/NOAA17 卫星数据。NOAA17 属第四代极轨业务气象卫星,其上先进的甚高分辨率辐射计(AVHRR)新增加一个 1.6 μm 的观测通道成为 AVHRR3,与红外短波窗通道 3.7 μm 交替使用,即白天用 1.6 μm 通道工作,晚间用 3.7 μm 工作。在对大量卫星数据分析的基础上,选取 2005 年 3 月 17 日地面站接收的 AVHRR3/NOAA17 数据为例来说明海雾及其它目标物的遥感辐射光谱特性。

在模拟卫星高度处传感器接收到的辐射时,选

择 Streamer 辐射传输模式^[20]。该模式利用离散纵坐标法直接计算辐射率、反射率或等效亮温^[21],对不同云系的消光系数、单次散射反射率和不对称因子等光学特性有较明细的参数化设定。其中海雾、液态水云参数化采用 Hu 和 Stamnes^[22]的方法,冰云采用 Fu 和 Liou 的^[23]参数化方案;散射相函数采用双项 Henyey-Greenstein 函数^[24]全面地表现云雾粒子的前向和后向散射。另外,该模式具有可融入不同传感器的通道光谱响应函数的特点,能够更好地模拟出云雾的卫星遥感辐射特性。

3 卫星遥感观测分析

卫星高度处接受的辐射主要包括经地气系统作用后的太阳短波和地球长波辐射,在可见光、近红外波段,以太阳短波辐射为主,卫星接收的遥感信息主要反映卫星观测视场内目标物的光谱反射信息,在实际运用中,常用归一化表观反射率表示。研究通过大量卫星观测数据分析了海雾与晴空水体、其它云系在卫星仪器不同通道上的辐射反射特性。给出了 2005 年 3 月 17 日发生在渤海的一次海雾事件 AVHRR3/NOAA17 卫星图像,选择通过不同地物的剖面,分析不同地物在可见光 Ch1(0.58~0.68 μm)、Ch2(0.725~1.0 μm)和近红外通道 Ch3a(1.58~1.64 μm)沿剖线的光谱变化,说明了海雾的卫星辐射特性。

图 1 为通道 1、2 合成图,不同地物三通道光谱沿剖线的变化。图 1 中清晰表明,无论是清洁水体还是泥沙含量较高的浑浊水体三通道反射率满足: $R_{\text{Ch1}} > R_{\text{Ch2}} > R_{\text{Ch3a}}$,对清洁水体 R_{Ch1} 总小于 10%,甚至更低;浑浊的近岸水体 R_{Ch1} 也没有超过 20%;一般高云、中云同样满足: $R_{\text{Ch1}} > R_{\text{Ch2}} > R_{\text{Ch3a}}$,虽然高云在 Ch3a 的反射率要远低于中云的,但通道反射率都高于 20%。但是,海雾区具有不同的通道关系: $R_{\text{Ch1}} > R_{\text{Ch3a}} > R_{\text{Ch2}}$,三通道反射率比较接近且变化相似,一般介于 25%~45%之间。

4 辐射传输模式模拟研究

在实测卫星资料的光谱分析中,不同地物通道辐射的剖面变化清晰地反映了海雾不同于其它地物的卫星辐射特性。但这种基于大量卫星测量数据的统计分析结果,并不具有广泛性、一般性。为此,研究结合 AVHRR3/NOAA17 波段通道光谱响应函数,通过 Streamer 辐射传输模式模拟分析不同云系

在卫星高度处通道光谱反射率,一般性地说明海雾的卫星通道辐射光谱特性。表 1 列出了辐射传输模式模拟计算中采用的云雾大气特征参数。研究考虑四种云系:海雾、低云、中云和高云,具体设计了 2 个

模拟试验:1)固定太阳天顶角,星下点观测状况下,不同云系在三通道上的反射率随云层光学厚度的变化;2)固定云层光学厚度,星下点观测状况下,不同云系在三通道上的反射率随太阳天顶角的变化。

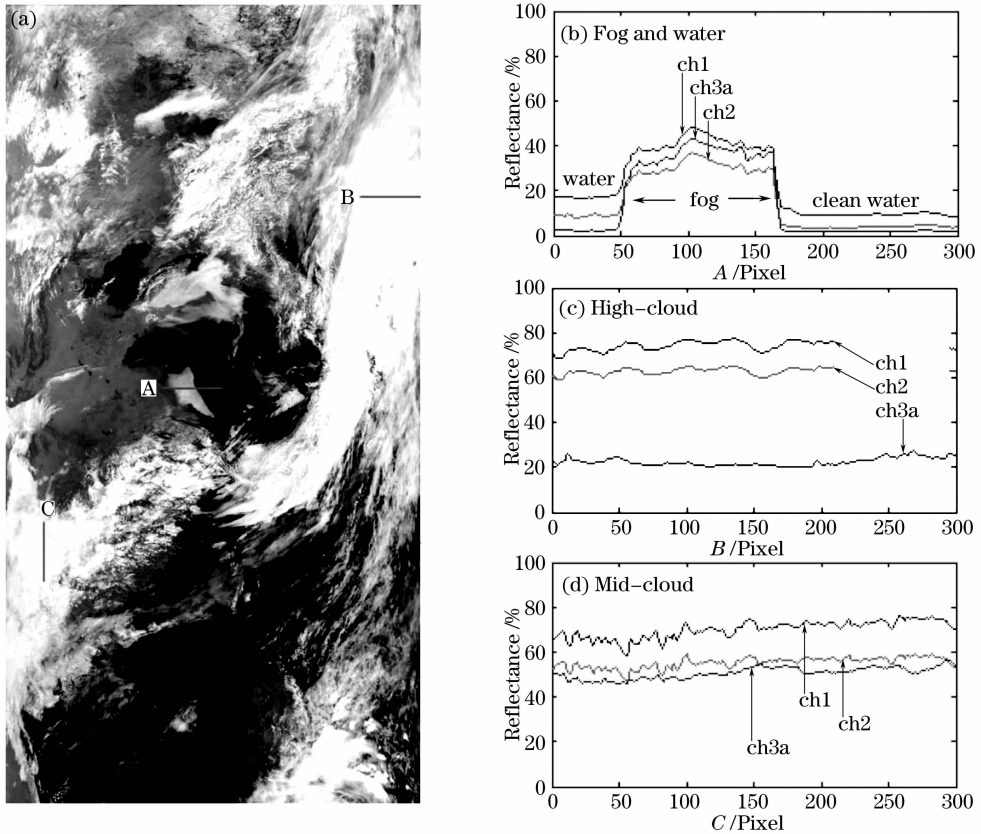


图 1 2005 年 3 月 17 日 2 时 30 分(UTC)AVHR3/NOAA17 通道 1 和通道 2 合成图(a)和图中剖线三通道光谱反射率变化[(b),(c),(d)]

Fig. 1 Synthetical image of channel 1 and 2 for 0230 UTC 03/17/2005 (a) and the reflectance variation of three channels along three profiles [(b),(c),(d)]

表 1 辐射传输模拟计算中采用的云大气特性

Table 1 Characteristics of cloud and atmosphere using in radiative transfer model

Parameters	Sea fog	Low cloud	Middle cloud	High cloud
Cloud height range /km	0~0.2	0.2~0.4	2~3	8~9
Cloud particle effective radius $R_e/\mu\text{m}$	8	12	15	50
Cloud optical thickness T_{au}	8	8	15	15
Cloud particle phase and shape	Liquid spherical particle	Liquid spherical particle	Liquid spherical particle	Ice hexagonal solid columns
Atmospheric profile	Mid-latitude summer			
Aerosol optical model and the vertical distribution	Maritime, background tropospheric aerosols, 50 km visibility			
Surface type	Open sea water, albedo: 0.06			
Solar zenith angle θ_0	30°, 40°			
Satellite observation angle θ	0°, at nadir			

图 2(a1),(b1),(c1),(d1)给出了试验 1)的模拟结果,图 2(a2),(b2),(c2),(d2)给出了试验 2)的模拟结果。模拟结果全部清晰地再现了不同云系目标物,

在不同的观测状况和云系特征状况下,三通道表现反射率之间的关系,海雾: $R_{\text{Ch1}} > R_{\text{Ch3a}} > R_{\text{Ch2}}$,中、高云区: $R_{\text{Ch1}} > R_{\text{Ch2}} > R_{\text{Ch3a}}$,与卫星遥感观测分析的结果

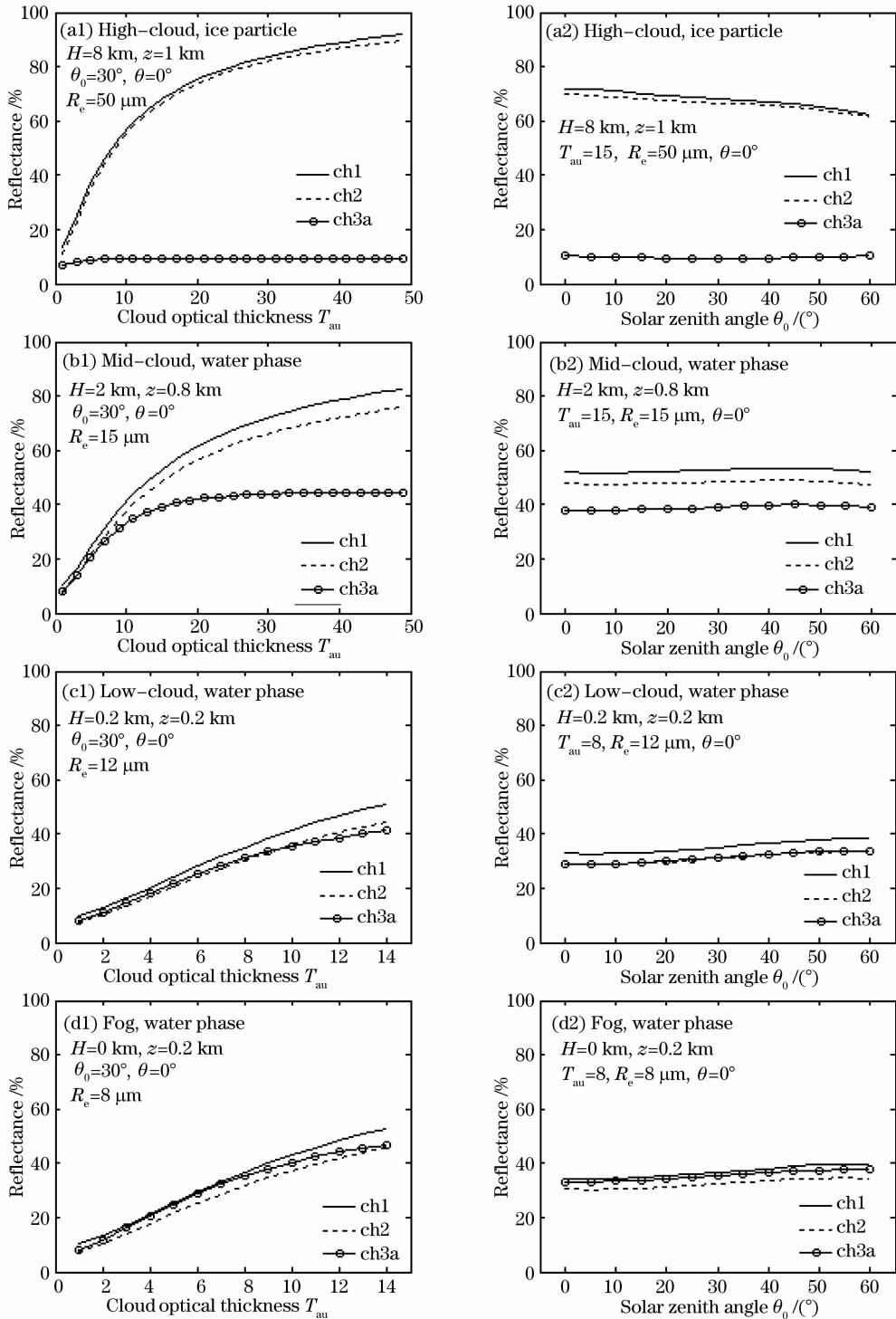


图 2 辐射模拟不同云系在 AVHRR3 三通道的反射率随云层光学厚度 [(a1), (b1), (c1), (d1)] 和太阳天顶角 [(a2), (b2), (c2), (d2)] 的变化

Fig. 2 Simulated cloud reflectance varies with cloud optical thickness [(a1), (b1), (c1), (d1)] and solar zenith angle [(a2), (b2), (c2), (d2)]

一致。虽然模拟结果显示，低云系在小光学厚度下也具有类似海雾的特征，但在大光学厚度时具有一般云系的通道关系。由此可见，不同状况下，辐射模拟结果与观测结果，目标物在三通道间辐射特征关

系的一致性，说明观测结果可信，具有广泛性。

为了更为详细、全面地分析海雾的通道辐射关系，研究进一步模拟了不同海雾微物理参数，如：雾水含量，雾滴粒径等变化时，海雾的通道辐射关系。

具体模拟研究了太阳天顶角为 40° ，卫星观测角为 0° (星下点观测)，雾滴有效粒径为 $8 \mu\text{m}$ ，雾层反射率对雾层几何厚度 (雾顶高度)、雾水含量和雾滴粒径的变化响应。图 3 给出了相应的模拟结果，其中图 3(a)、图 3(b) 分别是固定雾水含量、雾层光学厚度时，雾层反射率随雾顶高度的变化；图 3(c)、图 3(d) 为固定雾层几何高度和雾滴粒径或光学厚度下，雾层反射率随液水含量和粒径的变化。结果表明，

不同微物理特性的雾层三通道关系仍然满足 $R_{\text{Ch1}} > R_{\text{Ch3a}} > R_{\text{Ch2}}$ ，甚至会出现 $R_{\text{Ch3a}} > R_{\text{Ch1}} > R_{\text{Ch2}}$ ，这在各别海雾实例卫星观测数据分析中也是存在的。另外，当雾层光学厚度一定，高度一定时， R_{Ch1} 、 R_{Ch2} 对雾滴粒径的响应不明显，只是在雾滴粒径较小时，才表现出不大的变化；而 R_{Ch3a} 对雾滴粒径的变化响应明显。

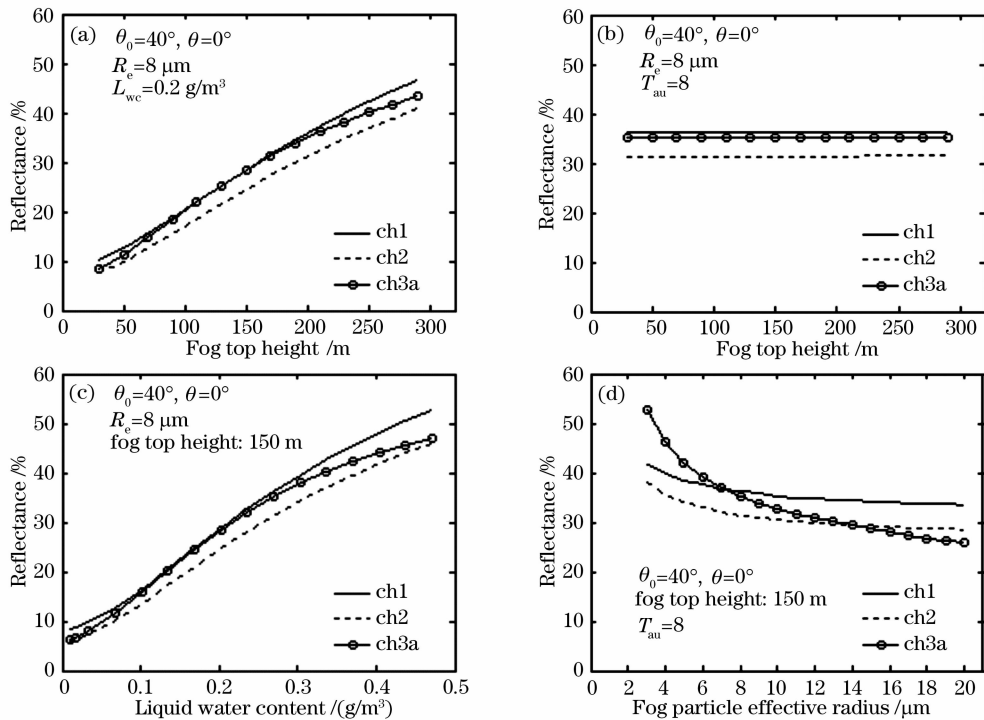


图 3 同一观测角度下，海雾区三通道反射率随雾层不同参数的变化

Fig. 3 Reflectance of fog varies with different fog properties at the same viewing angle

5 原因分析

可见光遥感监测中，卫星接收的辐射主要包括两方面：1) 地球表面、云雾层反射的太阳辐射；2) 地球大气中大气分子、气溶胶粒子和云层粒子等对太阳辐射的散射辐射。散射是指电磁波通过某些介质时，由于这些介质的折射率具有非均一性，引起入射波波阵面的扰动，造成入射波中一部分能量偏离原传播方向而以一定规律向其它方向发射的过程^[25]。云雾粒子的光谱散射、消光等光学特性的研究是基于米氏散射理论^[26,27]。由米氏散射理论知，粒子散射的大小可用散射效率 $Q_{\text{sca}}(\chi, m)$ 表征，其大小与大气折射指数 m 以及粒子半径 r 和入射辐射波长 λ 的相对大小，即粒子尺度参数 $\chi = 2\pi r/\lambda$ 有关^[28,29]。散射效率表示辐射通过粒子层时，粒子通过散射从入射辐射中提取的能量与入射辐射能量之比，其大

小反映了散射过程从入射辐射中取走的能量多少。通常情况下，雾滴和云滴相比，其粒径小而均匀，雾滴的平均半径大约为几微米，且雾中常包含有大量半径为 $1 \mu\text{m}$ 的微滴；低层云粒子的半径大于 $5 \sim 6 \mu\text{m}$ ；中云粒子的半径在 $10 \mu\text{m}$ 以上；高云粒子半径在 $30 \mu\text{m}$ 以上。由粒子尺度参数知，同一粒径对不同波长，同一波段对不同大小粒径，散射效率都有所不同。对于 Ch1 (中心波段 $0.64 \mu\text{m}$)，Ch2 (中心波段 $0.82 \mu\text{m}$)，Ch3a (中心波段 $1.6 \mu\text{m}$) 波段，一般中、高云粒子 (不考虑冰相云滴，其机制不同) 半径远远大于这些波长，散射效率趋于常数 2，如图 4 所示。此时三通道接收的辐射受散射影响效果相当，都比较小，对同一目标物中高云类，反射率都较高，卫星接收的辐射与入射辐射大小有关，经云滴作用后仍保持三波段入射辐射的大小关系 ($R_{\text{Ch1}} > R_{\text{Ch2}} >$

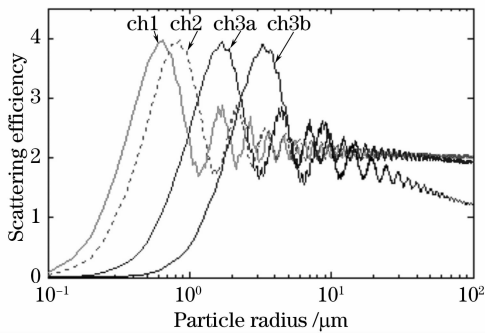


图4 不同波段处小块云体一次散射的散射效率对粒径大小的变化

Fig. 4 Scattering efficiency of single scatter varies with particle size for cloud at different wavelengths

R_{Ch3a})。然而对于雾滴或小粒径的低云滴而言,半径为几微米,仍远大于通道 Ch1 和 Ch2 波长,其散射效率 $Q_{sca}(\chi, m)$ 也近趋于常数 2,其间的反射率关系仍保持入射辐射的关系 $R_{Ch1} > R_{Ch2}$; 通道 Ch3a (1.58~1.64 μm), 处于近红外波段,其辐射特征以可见光为主导的。云雾滴半径与之相当,或相差不大,此时散射效率 $Q_{sca}(\chi, m)$ 不再趋于常数 2,而高于 2,甚至会达到最大值,这样云雾滴粒子对 Ch3a 波段的散射的作用也较大,不可忽略,结果增加了该波段卫星接收方向上的辐射,打破了三通道在入射前的辐射关系,致使 Ch3a 的反射率高于 Ch2 的,甚至出现相当或高于 Ch1 波段上的反射率。此外对 Ch3b(3.55~3.99 μm) 中红外波段,波长跟雾滴粒径大小更为相当,似乎散射效率会更大,但是此波段以红外辐射为基本特征,所以对雾滴粒子,并不具有 Ch3a 通道的辐射性质。

6 结 论

通过分析卫星实测资料和辐射传输模拟数据,发现海雾在可见光 Ch1、Ch2 和近红外 Ch3a 波段的卫星遥感表观反射率满足: $R_{Ch1} > R_{Ch3a} > R_{Ch2}$, 甚至出现 $R_{Ch3a} > R_{Ch1} > R_{Ch2}$, 不同于水体、其它云系目标物: $R_{Ch1} > R_{Ch2} > R_{Ch3a}$, 该辐射特性具有广泛性、一般性。通过米氏散射理论分析解释了海雾光谱辐射特性的原因: Ch3a 波段的辐射对云、雾滴粒子的尺度有一定的分辨能力; 在通常情况下,雾滴粒径小于一般云滴粒子,这引起了海雾不同于其它云系的遥感光谱辐射特性。也就是说对可见光波段 Ch1、Ch2, 无论是云滴还是雾滴,其粒子半径一般都远高于该波长,不同大小的云、雾滴粒子在该通道上的散射性质与粒子的大小关系不大; 而对近红外波段 Ch3a,

雾滴粒子与该波段波长相当,散射较大,加大了该通道的地球表观反射率,而云滴粒径高于该波段波长,散射不明显。海雾遥感光谱辐射特性的发现为白天业务化海雾卫星监测提供了重要科学依据。

值得注意的是,模拟数据显示小粒径的低层云系存在类似海雾的辐射特性。虽然实际低层云的粒径不会太小,但是为有效地监测海雾,进一步的研究将着重从云层高度、红外亮温等其它角度,分析海雾和小粒径低层云的差别; 或者分析多光谱卫星观测和辐射模拟数据,结合散射理论,针对性地给出海雾遥感的优化通道。

致谢 感谢卫星海洋环境动力学国家重点实验室的卫星地面站提供的 AVHRR3/NOAA17 资料。

参 考 文 献

- China Meteorological Administration. *Ground Weather Observation Criterion* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003. 23
- 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 23
- Wang Binhua. *Sea Fog* [M]. Beijing: China Ocean Press, 1983. 1~4
- 王彬华. 海雾[M]. 北京: 海洋出版社, 1983. 1~4
- Ahn M H, Sohn E H, Hwang B J. A new algorithm for sea fog/stratus detection using GMS-5 IR data [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**(6): 899~913
- Bendix J. A satellite-based climatology of fog and low-level stratus in Germany and adjacent areas [J]. *Atmospheric Research*, 2002, **64**(1): 3~18
- Hunt G E. Radiative properties of terrestrial clouds at visible and infrared thermal window wavelengths [J]. *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 1973, **99**: 346~369
- Eyre J R, Brownscombe J L, Allam R J. Detection of fog at night using advanced very high resolution radiometer (AVHRR) imagery [J]. *Meteorological Magazine*, 1984, **113**: 266~271
- Turner J, Allam R J, Maine D R. A case study of the detection of fog at night using channels 3 and 4 on the advanced very high resolution radiometer (AVHRR) [J]. *Meteorological Magazine*, 1986, **115**: 285~290
- Bendix J, Bachmann M. A method for detection of fog using AVHRR imagery of NOAA satellites suitable for operational purposes (in German) [J]. *Meteorologische Rundschau*, 1991, **43**(2): 169~178
- Lee T F, Turk F J, Richardson K. Stratus and fog products using GOES-8-9 3.9- μm data [J]. *Weather and Forecasting*, 1997, **12**(3): 664~677
- Reudenbach C, Bendix J. Experiments with a straightforward model for the spatial forecast of fog/low stratus clearance based on multi-source data [J]. *Meteorological Applications*, 1998, **5**(3): 205~216
- Underwood S J, Ellrod G P, Kuhnert A L. A multiple-case analysis of nocturnal radiation-fog development in the central valley of California utilizing the GOES nighttime fog product [J]. *J. Applied Meteorology*, 2004, **43**(2): 297~311
- Turk J, Vivekanadan J, Lee T *et al.*. Derivation and applications of near-infrared cloud reflectances from GOES-8 and GOES-9 [J].

- J. Applied Meteorology*, 1998, **37**(8): 819~831
- 13 Li Yachun, Sun Han, Li Xiangge *et al.*. Study on detection of daytime fog using GMS-5 weather satellite data[J]. *J. Nanjing Institute of Meteorology*, 2001, **24**(3): 343~349
李亚春, 孙 涵, 李湘阁等. 用 GMS-5 气象卫星资料遥感监测白天雾的研究[J]. *南京气象学院学报*, 2001, **24**(3): 343~349
- 14 Zhou Hongmei, Tan Jianguo, Ge Weiqiang *et al.*. Automatic detection and rehabilitation of cloud/fog pollution in NOAA/AVHRR imagery[J]. *J. Natural Disasters*, 2003, **12**(3): 41~47
周红妹, 谈建国, 葛伟强等. NOAA 卫星云雾自动检测和修复方法[J]. *自然灾害学报*, 2003, **12**(3): 41~47
- 15 Chen Wei, Zhou Hongmei, Yuan Zhikang. Recognition of fog and cloud in meteorological satellite image based on fractal texture structure analysis [J]. *J. Natural Disasters*, 2003, **12**(2): 133~139
陈 伟, 周红妹, 袁志康等. 基于气象卫星分形纹理的云雾分离研究[J]. *自然灾害学报*, 2003, **12**(2): 133~139
- 16 Sun Han, Sun Zhaobo, Li Yachun. Meteorological satellite remote-sensing spectral characteristics of fog [J]. *J. Nanjing Institute of Meteorology*, 2004, **27**(3): 289~301
孙 涵, 孙照渤, 李亚春. 雾的气象卫星遥感光谱特征[J]. *南京气象学院学报*, 2004, **27**(3): 289~301
- 17 Bendix J, Thies B, Nauss T *et al.*. A feasibility study of daytime fog and low stratus detection with TERRA/AQUA-MODIS over land[J]. *Meteorological Applications*, 2006, **13**(2): 111~125
- 18 Ma Huiyun, Li Deren, Liu Liangming *et al.*. Fog detection based on EOS MODIS data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, **30**(2): 143~145
马慧云, 李德仁, 刘良明等. 基于 MODIS 卫星数据的平流雾检测研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2005, **30**(2): 143~145
- 19 Deng Jun, Bai Jie, Liu Jianwen *et al.*. Detection of daytime fog using MODIS multispectral data[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2006, **34**(2): 188~193
邓 军, 白 洁, 刘健文等. 基于 MODIS 多通道资料的白天雾监测[J]. *气象科技*, 2006, **34**(2): 188~193
- 20 Key J, Schweiger A J. Tools for atmospheric radiative transfer: Streamer and FluxNet [J]. *Computers and Geosciences*, 1998, **24**(5): 443~451
- 21 Stamnes K, Tsay S C, Wiscombe W *et al.*. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(12): 2502~2509
- 22 Hu Y X, Stamnes K. An accurate parameterization of the radiative properties of water clouds suitable for use in climate models[J]. *J. Climate*, 1993, **6**(4): 728~742
- 23 Fu Q, Liou K N. Parameterization of the radiative properties of cirrus clouds [J]. *J. Atmospheric Sciences*, 1993, **50**(13): 2008~2025
- 24 Hu Y X, Wielicki B, Lin B *et al.* δ -fit: A fast and accurate treatment of particle scattering phase functions with weighted singular-value decomposition least-squares fitting [J]. *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2000, **65**(4): 681~690
- 25 Chen Weimin. *Satellite Meteorology* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003. 123~133
陈渭民. *卫星气象学*[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 123~133
- 26 Yuan Jiangtao, Yang Li, Xie Jun *et al.*. Study on extinction properties of water fog particles in multi-spectrum based on Mie theory[J]. *Optical Technique*, 2007, **32**(3): 459~461
袁江涛, 杨 立, 谢 骏等. 基于 Mie 理论的水雾粒子多光谱消光特性研究[J]. *光学技术*, 2007, **32**(3): 459~461
- 27 Chen Daoqun, Huang Qijun, Yi Fan *et al.*. Optical properties of cirrus based on Mie theory [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, **6**(1): 65~70
陈道群, 黄启俊, 易 凡等. 基于 Mie 散射的卷云光学特性[J]. *光学与光电技术*, 2008, **6**(1): 65~70
- 28 Xiang Jiansheng, He Junhua. Numerical calculation of Mie theory[J]. *J. Applied Optics*, 2007, **28**(3): 363~366
项建胜, 何俊华. Mie 光散射理论的数值计算方法[J]. *应用光学*, 2007, **28**(3): 363~366
- 29 Liou K N. *An Introduction to Atmospheric Radiation* [M]. 2nd ed., San Diego: Academic Press, 2002. 96~97