

雪粒径对积雪双向反射率的影响

王剑庚^{1,2,3}, 冯学智^{1,2}, 肖鹏峰^{1,2*}, 梁继⁴, 李云^{1,2}, 林金堂^{1,2}, 李晖^{1,2}

(1. 南京大学地理信息科学系, 江苏南京 210046;

2. 南京大学江苏省地理信息技术重点实验室, 江苏南京 210046;

3. 南京信息工程大学大气物理学院, 江苏南京 210044;

4. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要:雪粒径大小影响着积雪反照率的高低, 从而影响着局地或全球能量收支平衡和气候变化, 其影响程度取决于积雪本身的微物理特征和光学特性. 在研究 550~1030 和 1 640 nm 波长处积雪光学特性的基础上, 采用辐射传输方程模拟并分析了雪粒径对积雪双向反射率的影响. 模拟结果表明近红外通道 1 030 nm 是反演雪粒径的敏感波长, 积雪双向反射率在该波段随粒径和观测角度变化明显, 多角度遥感信息可以更有效地体现积雪的微物理特征和光学特性, 为利用多角度遥感数据反演雪粒径提供理论基础.

关键词:积雪; 粒径; 辐射传输; 微物理特征; 光学特性; 双向反射率

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

The influence of snow grain size on snow bidirectional reflectance

WANG Jian-Geng^{1,2,3}, FENG Xue-Zhi^{1,2}, XIAO Peng-Feng^{1,2*},

LIANG Ji⁴, LI Yun^{1,2}, LIN Jin-Tang^{1,2}, LI Hui^{1,2}

(1. Department of Geographic Information Science, Nanjing University, Nanjing 210046, China;

2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology,
Nanjing University, Nanjing 210046, China;

3. School of Atmosphere Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

4. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The snow albedo which is influenced by the snow grain size, plays an important role in regional or global radiation balance and climate change. The degree of influence depends on the microphysical and optical properties of snow. In this paper, the influence of snow grain size on sensitivity of snow bidirectional reflectance was simulated and analyzed by the radiative transfer equation based on the studies of snow optical characteristics in 550 nm, 1030 nm and 1 640 nm. The results indicate that the near-infrared channel 1 030 nm is the sensitive wavelength to retrieve snow grain size. In this band, snow bidirectional reflectance changes significantly when grain size and view angle change. This study provides the theoretical basis for retrieving snow grain size with the multi-angular remote sensing data.

Key words: snow; grain size; radiative transfer model; microphysical characteristics; optical properties; bidirectional reflectance

PACS: 78.20.Bh, 92.40.Ea, 78.40.-q

引言

积雪是冰冻圈的重要组成部分, 也是地表最活

跃的自然要素之一, 与其他地物相比其反射率较高, 监测和反演积雪反照率的变化对于局地或全球能量收支平衡和水资源管理等具有重要意义^[1-3]. 雪粒径

收稿日期: 2012-04-28, 修回日期: 2012-10-09

Received date: 2012-04-28, revised date: 2012-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271353, 41101319); 江苏省研究生培养创新工程基金项目(CXZZ11_0032); 中国科学院西部之光人才培养计划项目(29Y229D31)和江苏高校优势学科建设工程资助项目

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (41271353, 41101319), Graduate Education Innovation Project of Jiangsu Province (Grant No. CXZZ11_0032), West Light Program of Talent Cultivation of the Chinese Academy of Sciences (29Y229D31) and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD).

作者简介(**Biography**): 王剑庚(1982-), 男, 甘肃定西人, 博士, 主要研究领域为雪冰遥感. E-mail: wjg0932@gmail.com.

* 通讯作者(**Corresponding author**): E-mail: xiaopf@gmail.com.

是表征积雪状态的重要参数之一,也是引起积雪反照率变化的主要因素之一^[4-6]. 积雪主要分布于中高纬度和高海拔地区,这些地区条件恶劣且较难到达,因此遥感作为对地观测的主要手段在发展之初就被用于大范围积雪监测和参数反演^[7]. 利用遥感反演雪粒径的核心问题是建立雪粒径与遥感数据的定量关系,积雪遥感发展初期常利用积雪在可见光区域的高反射和在近红外、短波红外波段的独特吸收谷,利用朗伯体和平面平行假设建立如归一化积雪指数(Normalized Difference Snow Index, NDSI)、比值积雪指数(Ratio Snow Index, RSI)和差值积雪指数(Difference Snow Index, DSI)等进行雪粒径的反演^[8]. 然而雪面并不是朗伯体,其各向异性特征明显,积雪反射率受地形和观测几何影响较大,要提高雪粒径的反演精度,不仅要研究积雪的光谱吸收、反射特征,而且要研究积雪光谱在不同地形和观测几何时的变化规律.

双向反射率分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)可以完整地描述一个表面的方向性反射特征^[9],对于雪面 BRDF 的研究可以提高对积雪方向反射的认识,随着遥感技术的发展,已发射了如 ATSR-2、POLDER 和 MISR 等可以同时观测光谱信息和角度信息的传感器,如何有效地结合光谱和角度信息提高雪粒径反演的精度,一直受到学者的重视. O'Brien 等最早测量了积雪的 BRDF 特性,指出雪粒径是影响雪面双向反射率的主要参数之一^[10]; Li 和 Zhou 利用米氏散射理论和几何光学模型模拟了雪面 BRDF 在特定波长处的变化特征,得到了较好的结果^[11]; Painter 和 Doizer 利用米氏散射理论和辐射传输离散坐标法(Discrete Ordinates Radiative Transfer, DISORT)计算了雪面 BRDF 特性,并分析了双向反射率随粒径和太阳入射角的变化情况^[12].

以上研究表明,雪粒径对雪面双向反射率的影响明显,要提高雪粒径的遥感反演精度,需要从雪粒的微物理特征和光学特性对雪面双向反射率的影响着手. 本文根据自然状态积雪的颗粒变化情况和对雪粒径敏感的波长,以颗粒散射理论和辐射传输模型为基础,通过模拟不同大小积雪颗粒对波谱双向反射率的影响,建立雪粒径与积雪 BRDF 之间的定量关系,为进一步的雪粒径多角度遥感反演奠定理论基础.

1 原理与方法

自然积雪是由致密颗粒状介质组成的散射体,

其表面粗糙度为毫米级到厘米级,为计算积雪表面的辐射特性,要分别计算雪粒的单次散射和多次散射.

1.1 雪粒单次散射特性计算

雪粒的单次散射特性由颗粒的大小、形状、粒子谱分布和复折射指数等微物理特征决定. 自然状态下积雪粒子是非球形的,但是在雪粒变形的自然力作用下雪粒趋向于球形,因此可以用等效体积直径把非球形的雪粒看作球形粒子^[6]. 假设积雪表面为水平半无限介质,内部由随机分布、随机朝向的球形雪粒构成. 用经典的米氏散射理论计算表征雪粒单次散射特性的参数即雪粒的单次散射反照率(Single Scattering Albedo, 简称 ω)和不对称因子(Asymmetry Factor, 简称 g)等. 雪粒子谱分布具有一定的特征形状,假设雪粒谱分布函数为幂律分布(Power Law Distribution),表达为^[13]:

$$n(r) = \begin{cases} \frac{2r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \times r^{-3}, & r_1 \leq r \leq r_2 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}, \quad (1)$$

$$r_{\text{eff}} = \frac{r_2 - r_1}{\ln(r_2/r_1)}$$

$$V_{\text{eff}} = \frac{r_2 + r_1}{2(r_2 - r_1)} \ln(r_2/r_1) - 1$$

其中: r_1 为最小半径, r_2 为最大半径,由输入参数有效半径(r_{eff})和有效方差(v_{eff})计算得到.

1.2 积雪方向反射率计算

雪面方向反射率计算的一个核心环节是辐射传输方程的求解,本文采用 Mishchenko 提出的一种准确求解辐射传输方程的解法^[14],该方法假设散射面是光学半无限且宏观平坦,并由任意形状、任意朝向且随机分布的颗粒组成,忽略入射光的偏振作用. 设已知入射电磁波的入射方向($\mu_0, \varphi_0 = 0$),则反射的辐亮度可表示为:

$$I(-\mu, \varphi) = \mu_0 R(\mu, \mu_0, \varphi) F, \quad (2)$$

其中, μ_0 是入射天顶角余弦, μ 是反射天顶角余弦, φ 是反射方位角; $R(\mu, \mu_0, \varphi)$ 是双向反射率分布函数, πF 是入射光的辐照度.

当忽略堆积密度、相干散射和阴影的影响时,双向反射率分布函数可以由传统的辐射传输方程得到准确解. 将函数 $R(\mu, \mu_0, \varphi)$ 按方位角 φ 作傅里叶级数展开,得到:

$$R(\mu, \mu_0, \varphi) = R^0(\mu, \mu_0) + 2 \sum_{m=1}^{m_{\max}} R^m(\mu, \mu_0) \cos(m\varphi) \quad (3)$$

从而通过求解阿氏非线性积分方程 (Ambartsumian's equation) 得到方向反射率. 阿氏非线性积分方程表达如下:

$$\begin{aligned} (\mu + \mu_0) R^m(\mu, \mu_0) &= \frac{\bar{\omega}}{4} P^m(-\mu, \mu_0) \\ &+ \frac{\bar{\omega}}{2} \mu_0 \int_0^1 P^m(\mu, \mu') R^m(\mu', \mu_0) d\mu' \\ &+ \frac{\bar{\omega}}{2} \mu \int_0^1 R^m(\mu, \mu') P^m(\mu', \mu_0) d\mu' \\ &+ \bar{\omega} \mu \mu_0 \int_0^1 \int_0^1 R^m(\mu, \mu') P^m(-\mu', \mu'') \\ &R^m(\mu'', \mu_0) d\mu' d\mu'', \quad (4) \end{aligned}$$

其中, $\bar{\omega}$ 为雪粒的单次散射反照率, $P^m(\mu, \mu')$ 为相函数的傅里叶分量.

2 结果与分析

选择入射单色光波长为可见光通道 550 nm、近红外通道 1 030 nm 和短波红外通道 1 640 nm, 对应波长处雪粒的复折射指数为: $1.311 + i3.133 \times 10^{-5}$ 、 $1.301 + i2.33 \times 10^{-6}$ 和 $1.288 + i2.595 \times 10^{-4}$, 入射方位角为 0° . 雪粒有效半径分别设为 50 μm (新雪)、200 μm (陈雪) 和 800 μm (粒雪), 有效方差均为 0.2 μm .

2.1 雪粒单次散射特征分析

单次散射反照率和不对称因子是表征雪粒单次散射的光学特性参量. 单次散射反照率描述了光子作用到雪颗粒上被散射的概率; 不对称因子反映散射角度的不对称程度: $g = 0$ 表示各向同性散射; $g = -1$ 表示完全后向散射; $g = 1$ 表示完全前向散射. 表 1 是不同粒径大小和波长时雪粒的单次散射反照率和不对称因子, 可以看到任意波段和粒径大小的雪粒都具有很强的前向散射 ($g > 0.88$), 在各波段

随着粒径的增大前向散射特性增强, 而单次散射反照率则减小, 这主要是因为随着的粒径增大, 使得衍射峰变窄变高, 增大了前向散射且光子被吸收的概率增大. 在 550 nm 处雪粒的单次散射反照率随粒径大小的变化不明显, 均大于 0.92, 而在 1 030 nm 和 1 640 nm 处单次散射反照率变化明显, 这是因为随着入射波长的增大雪粒的复折射指数的虚部明显增大, 即雪粒对光子的吸收能力增强.

表 1 不同粒径大小和波长时雪粒的单次散射反照率和不对称因子

Table 1 Single scattering albedo and asymmetry factor for different snow grain sizes and wavelength

	550 nm	1 030 nm	1 640 nm
50 μm	$\bar{\omega} = 1.000; g = 0.887$	$\bar{\omega} = 1.000; g = 0.891$	$\bar{\omega} = 1.000; g = 0.892$
200 μm	$\bar{\omega} = 0.999; g = 0.886$	$\bar{\omega} = 0.995; g = 0.894$	$\bar{\omega} = 0.981; g = 0.898$
800 μm	$\bar{\omega} = 0.924; g = 0.898$	$\bar{\omega} = 0.777; g = 0.929$	$\bar{\omega} = 0.585; g = 0.964$

图 1 为不同粒径大小和波长时相函数随散射角变化图, 从图中可以总结出单个雪粒的几个光学特性: 雪粒具有很强的前向衍射; 在约 100° 散射角处有极小值; 在约 138° 散射角处有峰值, 即虹特征; 在散射角为 180° 处有峰值; 在 $70 \sim 120^\circ$ 之间各种粒子尺寸和入射波长的相函数几乎相同, 粒子尺寸越大前向散射越强. 550 nm 时 (图 1a) 在 $10 \sim 60^\circ$ 之间的相函数一致, 随着粒径的增大前向散射明显增强, 且 138° 散射角的虹特征增强; 1 030 nm 时 (图 1b) 在 $10 \sim 60^\circ$ 散射角之间的相函数一致, 随着粒径的增大前向散射明显增强, 而 138° 散射角的虹特征基本不变; 1 640 nm 时 (图 1c) 随着粒径的增大前向散射明显增强, 在 $10 \sim 60^\circ$ 散射角之间的相函数有所减小, 而 138° 和 180° 散射角的峰值减小明显. 同一粒径大小波长越短前向散射越强, 即衍射越强; 在 138° 和 180° 散射角的峰值减弱且波长越长减弱越明显.

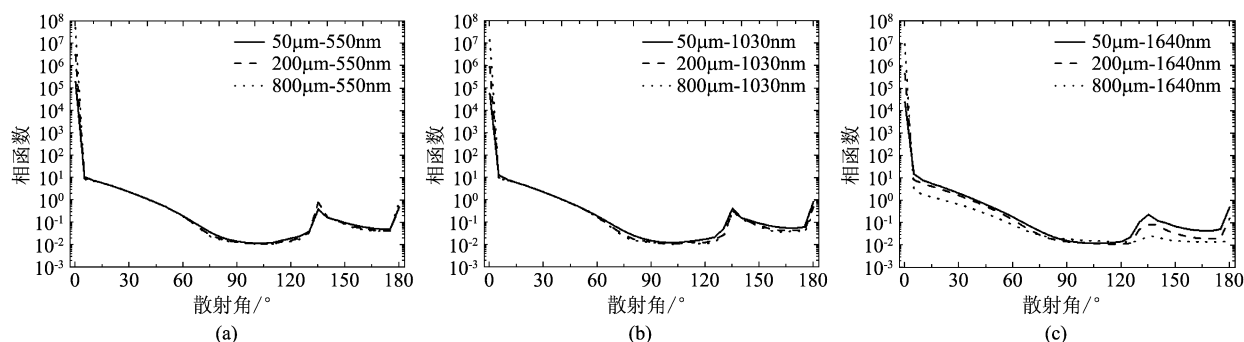


图 1 不同粒径大小和波长时相函数随散射角变化图. 入射波长分别为 (a) 550nm、(b) 1030nm、和 (c) 1640nm 时不同粒径的相函数变化图

Fig. 1 Phase functions of snow grain as a function of scattering angle for different grain sizes at several wavelengths. Phase function when incident wavelength is (a) 550nm, (b) 1030nm, and (c) 1640nm

2.2 积雪主平面方向反射率特征分析

主平面是入射方向与观测方向的垂线所组成的平面,该平面的观测相对方位角为 0° 和 180° ,其中包含了大量的双向反射特征信息.入射天顶角对雪面光谱反射率影响较大,本节取入射天顶角为 26° 、 46° 和 60° ,即入射天顶角余弦分别为 0.9、0.7 和 0.5 分析主平面的方向反射率随粒径和入射波长的变化特征.

图 2 为不同粒径大小和波长时主平面反射率的变化图,观测天顶角为正时表示后向散射方向(方位角为 0°),观测天顶角为负时表示前向散射方向(方位角为 180°).总的变化趋势是:随着入射天顶角的增大,在后向较大观测角时反射率增大,对应于相函数在散射角 180° 的峰值,而在后向较小角度和前向反射率逐渐降低,前向反射峰值减小,此处对应相函数在散射角 0° 的峰值.随着波长的增加,积雪的复折射系数虚部增大,即雪粒的吸收率增大使得更多的光子被吸收,导致反射率明显减小.

图 2(a) 是入射角为 26° 时主平面方向反射率随观测天顶角的变化图,由图中可以得到:前向和后向散射差异较小,主要表现为前向 75° 存在一反射峰值,这是虹特征,其各波段随粒径的增大而更加明显,入射方向和反射方向存在反射峰值,这是因为积雪具有较强的前向散射能力且当入射角度较小时反射较大; 550 nm 时前向和后向反射率随观测角度的增大而减小,且形状基本一致,前向散射峰值变化不大,而后向反射峰值随粒径的增大而减小,表明更多的光子被吸收; $1\ 030\text{ nm}$ 时反射率随粒径的增大减小明显,虹特征减弱,前向散射峰值随粒径的增大而有所减小,后向反射方向的反射率变化不大; $1\ 640\text{ nm}$ 时反射率差异较明显,但由于在该波段雪

粒的吸收能力很强,反射率很小 (<0.05),粒径越大吸收能力越强,前向和后向的散射峰值也验证了这一点;同一粒径大小在不同波长的反射率差异明显,随着入射波长的增大,反射率明显降低,粒径越大虹特征越明显.图 2(b) 是入射角为 46° 时主平面方向反射率随观测天顶角的变化图,由图中可以得到:前向和后向散射差异较小,积雪具有较强的前向散射,在前向 46° 有一反射峰值; 550 nm 时前向、后向散射分别随观测角度的增加而减小和增大,在后向大观测天顶角时 ($>80^\circ$) 反射率急剧下降且没有峰值,前向的峰值基本一致; $1\ 030\text{ nm}$ 时反射率随粒径的变化差异明显,粒径越小反射率越高且前向峰值越大,并在天顶处有一峰值; $1\ 640\text{ nm}$ 时各粒径大小的反射率均较小 (<0.2),天顶处峰值不明显,前向反射峰值随粒径变化明显,雪粒径为 $800\text{ }\mu\text{m}$ 时峰值消失,且反射率接近于 0,后向反射率随观测角度的增加而增大,大角度的反射率剧烈减小最后消失;同一粒径大小在不同波长的反射率差异明显,随着入射波长的增大,反射率明显降低.图 2(c) 是入射角为 60° 时主平面方向反射率随观测天顶角的变化图,由图中可以得到:前向和后向散射差异明显,积雪具有较强的前向散射,在前向 60° 有一反射峰值;观测角大于 45° 时具有较强的后向散射且观测角越大反射越强; 550 nm 时反射率随粒径的增大变化不大,其前向和后向大角度散射峰值随粒径的增大而有所增加,是因为粒径越大反射越强; $1\ 030\text{ nm}$ 时反射率随粒径的增大而减小,且在前向和后向较小观测天顶角时减小明显,前向和后向大角度散射峰值随粒径增大而减小; $1\ 640\text{ nm}$ 时反射率减小明显,且随粒径的增大减小速率增大,雪粒径为 $800\text{ }\mu\text{m}$ 时前向反射峰消失,后向大角度反射峰值明

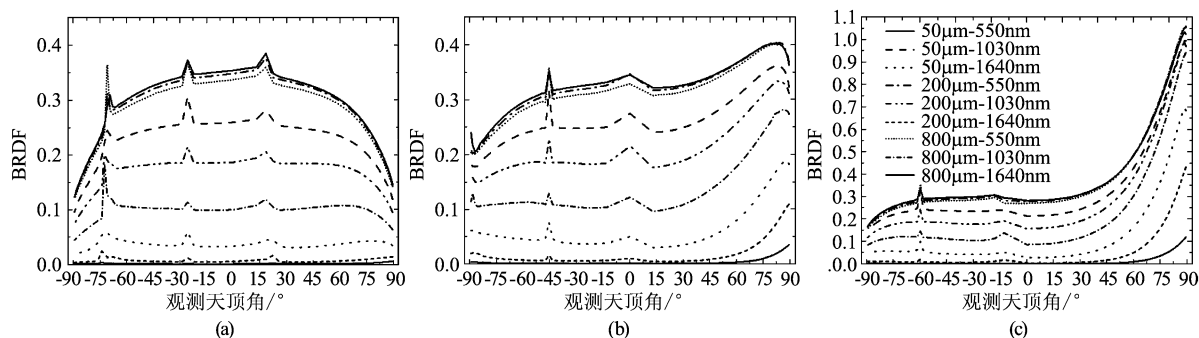


图 2 不同雪粒径大小和入射波长时主平面积雪反射率变化图.入射天顶角为分别(a) 26° 、(b) 46° 、和(c) 60° 时主平面反射率随粒径和波长的变化

Fig. 2 Snow reflectance in the principal plane for different grain sizes and wavelengths. Incident zenith angle is (a) 26° , (b) 46° , and (c) 60°

显降低至 0.1 左右. 同一粒径大小的反射率随着入射波长的增加而减小明显, 且粒径越大减小越明显.

本节通过对不同入射天顶角时主平面反射率随粒径大小和入射波长的变化分析, 得到: 入射光为 550 nm 时, 积雪反射率较高且随粒径的变化不明显; 而入射光为 1 640 nm 时, 由于积雪在该波段的吸收率较高, 反射率很低变化同样不明显. 近红外通道 1 030 nm 处于积雪光谱吸收波谷的谷底, 积雪反射率随粒径的变化明显且随观测角度的变化较大, 能更好地反映雪粒径的差异; 相对其他地物, 积雪在该波段仍然有较高的反射率, 能较好地地区别积雪和其他地物; 而且该波段还是大气窗口, 大气透射率较高, 受水汽影响较小^[15]. 因此三个波段相比 1 030 nm 是雪粒径反演的敏感波段.

2.3 积雪半球方向反射率特征分析

由上节分析得到 1 030 nm 是雪粒径反演的敏感波段, 因此本节取 1 030 nm 时入射角为 26°、46° 和 60°, 粒径大小为 50 μm 、200 μm 和 800 μm 的方

向反射率极化图进行分析.

图 3 是入射波长为 1 030 nm 时的雪面双向反射率极化图, 第一、二、三行入射角分别为 26°、46° 和 60°, 第一、二、三列粒径大小分别为 50 μm 、200 μm 和 800 μm , 极径和极角分别为观测天顶角和相对方位角, 灰度表示反射率强度. 由图中可以得到: 反射率随入射天顶角增加而增大, 这是因为观测角度较大时光子停留在积雪表面, 较多的只是发生单次散射, 而当入射天顶角较小时, 光子穿透雪层的深度增大, 发生多次散射和被吸收的概率增加. 另外, 在较大观测天顶角时都有圆环形峰值, 这是由于雪粒相函数的前向衍射峰造成的前向散射加强, 而且随着观测角度的增大而增强, 在接近掠射时达到最大; 极化图中下部的圆形峰值, 经计算对应于相函数在散射角 138° 的峰值, 即虹特征, 其随着相对方位角的增加而更加明显; 在圆环中心有一峰值, 对应的观测天顶角与入射天顶角对称, 对应于相函数在散射角 180° 的峰值. 随着粒径的增大后向散射峰值逐

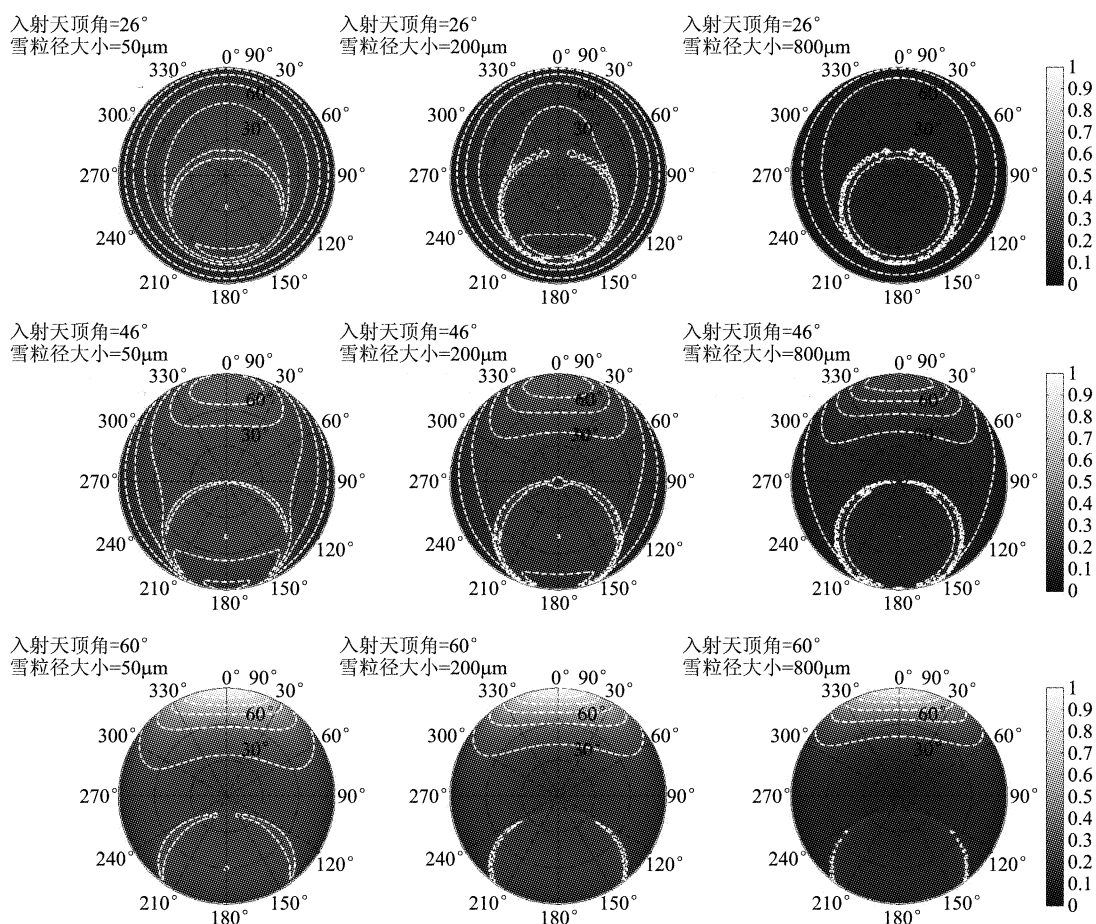


图 3 入射波长为 1 030 nm 时不同雪粒径和入射天顶角雪面双向反射率极化图

Fig. 3 Polar contour maps at wavelength of 1030nm incident at three incident zenith angles for different snow grain size

渐减小且虹特征更加明显,这是因为粒径的增加使得光子被吸收的概率增大而衍射峰越加变窄变高,增大了前向散射.

3 结论

利用颗粒散射理论和辐射传输方程模拟并分析了雪粒的单次散射特征和方向反射率分布函数随粒径大小和入射波长的变化规律,可以得到以下结果.

从积雪的单次散射特性可以看出光子被雪粒反射的概率很高而且具有很强的前向散射,在散射角 138° 时具有较明显的虹特征;当入射光波长为 550 nm 时,积雪反射率较高且随粒径的变化不明显;而入射光波长为 1 640 nm 时,由于积雪在该波段的吸收率较高,反射率很低变化同样不明显;入射光波长为 1 030 nm 时积雪反射率随粒径的变化明显且随观测角度的变化较大,有利于结合光谱和角度信息提高雪粒径的反演精度,同时在利用近红外 1 030 nm 波段反演雪粒径时还要注意入射天顶角的变化,结合散射角 138° 时的虹特征进行综合分析可以提高雪粒径的遥感反演精度.

REFERENCES

- [1] Aoki T, Aoki T, Fukabori M, *et al.* Effects of snow physical parameters on spectral albedo and bidirectional reflectance of snow surface [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**(D8): 10219–10236.
- [2] Domine F, Albert M, Huthwelker T, *et al.* Snow physics as relevant to snow photochemistry [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(2): 171–208.
- [3] Dozier J, Green R O, Nolin A W, *et al.* Interpretation of snow properties from imaging spectrometry [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**: S25–S37.
- [4] Wiscombe W J, Warren S G. A Model for the Spectral Albedo of Snow .1. Pure Snow [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1980, **37**(12): 2712–2733.
- [5] Warren S G. Optical properties of snow [J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1982, **20**(1): 67–89.
- [6] Colbeck S C. An Overview of Seasonal Snow Metamorphism [J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1982, **20**(1): 45–61.
- [7] Dietz A J, Kuenzer C, Gessner U, *et al.* Remote sensing of snow – a review of available methods [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, **33**(13): 4094–4134.
- [8] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, **54**(2): 127–140.
- [9] Schaepman-Strub G, Schaepman M E, Painter T H, *et al.* Reflectance quantities in optical remote sensing—definitions and case studies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **103**(1): 27–42.
- [10] O'Brien H W, Munis R H. Red and near-infrared spectral reflectance of snow [J]. *NASA Goddard Space Flight Center Operational Appl of Satellite Snowcover Observations*, 1975, 345–360.
- [11] Li S, Zhou X. Modelling and measuring the spectral bidirectional reflectance factor of snow-covered sea ice: an intercomparison study [J]. *Hydrological Processes*, 2004, **18**(18): 3559–3581.
- [12] Painter T H, Dozier J. The effect of anisotropic reflectance on imaging spectroscopy of snow properties [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **89**(4): 409–422.
- [13] Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres [J]. *Space Science Reviews*, 1974, **16**: 527–610.
- [14] Mishchenko M I, Dlugach J M, Yanovitskij E G, *et al.* Bidirectional reflectance of flat, optically thick particulate layers: an efficient radiative transfer solution and applications to snow and soil surfaces [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 1999, **63**: 409–432.
- [15] Nolin A W, Dozier J. Estimating Snow Grain-Size Using Aviris Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, **44**(2-3): 231–238.

(上接 197 页)

the members of the IMECAS compound semiconductor device department.

REFERENCES

- [1] Lai R, Mei X B, Deal W R, *et al.* Sub 50 nm InP HEMT device with $f_{\max}$ greater than 1 THz: IEEE International Electron Devices Meeting IEDM, 2007 [C]. Washington, DC, 2007:609–611.
- [2] Kim D-H, del Alamo J A. 30-nm InAs PHEMTs With $f_T = 644$ GHz and $f_{\max} = 681$ GHz [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2010, **31**(8):806–808.
- [3] Kim D-H, del Alamo J A. 30-nm InAs pseudomorphic HEMTs on an InP substrate with a current-gain cutoff frequency of 628 GHz [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2008, **29**(8):830–833.
- [4] Zimmer T, Ouro Bodi D, Dumas J M, *et al.* Kink effect in HEMT structures: A trap-related semi-quantitative model and an empirical approach for SPICE simulation [J]. *Solid State Electron*, 1992, **35**(10):1543–1548.
- [5] Suemitsu T, Enoki T, Sano N, *et al.* An analysis of the kink phenomena in InAlAs/InGaAs HEMTs using two dimensional device simulation [J]. *IEEE Transactions On Electron Devices*, 1998, **45**(12):2390–2399.
- [6] Grundbacher R, Lai R, Barsky M, *et al.* 0.1 μm InP HEMT devices and MMICs for cryogenic low noise amplifiers from X-band to W-band simulation; 14th Indium phosphide and related materials conference IPRM, 2002 [C]. Stockholm, Sweden, 2002:455–458.