

干旱区黑碳沉降积雪反照率及雪粒径模拟研究

曹肖奕¹,丁建丽^{1*},陈文倩²,王鑫³,崔杰桢³,张喆¹ (1.新疆大学资源与环境科学学院,绿洲生态教育部重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830046; 2.深圳大学化学与环境工程学院,光学工程博士后流动站,广东 深圳 518055; 3.兰州大学大气科学学院,半干旱气候变化教育部重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘要: 在以往研究基础上,利用单点实测数据驱动雪、冰及气溶胶辐射(SNICAR)区域物理模型,将微观数据与遥感的宏观技术相结合对积雪反照率与雪粒径进行数值模拟及反演.研究表明:积雪反照率会随着太阳天顶角的增大而增加,且在近红外波段的影响更加明显;在不同雪粒径、黑炭浓度下,积雪反照率都随着雪粒径、黑炭浓度的增大而减小,且颗粒越小的雪粒,粒径的减小对反照率的影响更为明显,而黑炭主要是对可见光波段有显著作用;利用 SNICAR 模型与 MODIS 数据反演北疆地区雪粒径,其精度可达 0.749,实现了单点雪粒径向面状雪粒径的尺度转换.本研究揭示了干旱区季节性积雪中,气溶胶粒子存在情况下的积雪反照率连续变化特征,有效提高了积雪中雪粒径的反演精度,为积雪中气溶胶粒子对气候产生的辐射胁迫模拟提供了技术支持.

关键词: 干旱区; 黑碳; 雪粒径; 雪、冰及气溶胶辐射模型(SNICAR); 积雪反照率; 辐射效应

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2020)06-2345-08

Simulation of snow albedo and snow grainsize in black carbon sedimentation in arid areas. CAO Xiao-yi¹, DING Jian-li^{1*}, CHEN Wen-qian², WANG Xin³, CUI Jie-can³, ZHANG Zhe¹ (1.Key Laboratory of Oasis Ecology, College of Resources & Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2.College of Chemistry and Environmental Engineering, Postdoctoral Program of Optical Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518055; 3.China Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China). *China Environmental Science*, 2020,40(6): 2345~2352

Abstract: Based on the previous research, the single point measured data was used to drive the SNICAR regional physical model, and the microscopic data was combined with the remote sensing macro technology to numerically simulate and invert the snow albedo and SGS. Results showed that the snow albedo increased with the increase of the solar zenith angle, and the impact in the near-infrared region was more obvious. Under different SGS and BC concentrations, the snow albedo decreased with the increase of SGS and BC concentration, and the smaller the particles, the smaller the particle size, the more obvious the effect on albedo, and BC was mainly for the visible light band. SNICAR model and MODIS data were used to invert the SGS in northern Xinjiang, the accuracy could reach 0.749, which realized the scale conversion of single-point SGS to planar SGS. Results revealed the continuous change of snow albedo in the presence of aerosol particles in seasonal snow in arid regions, effectively improved the accuracy of snow particle size retrieval in snow. Provided technical support for simulation of radiation stress caused by aerosol particles in snow.

Key words: aridregion; black carbon; snow grain size; SNICAR; snow albedo; radiation effect

积雪作为冰冻圈的重要组成部分,是地球上珍贵的淡水资源,是全球气候变化及自然地理环境变迁的重要指示性因子^[1-2].季节性积雪覆盖了地球陆地 30%以上的面积,且纯雪作为地球表面反照率最高的地物类型,是地表最活跃的自然要素之一,其积累与消融对陆表辐射平衡、能量循环、水资源分配以及调节区域或全球气候等均具有显著影响^[3-4].

近年来,积雪中气溶胶粒子产生的辐射胁迫等气候效应问题,已成为全球关注的热点问题.当积雪中的吸收性粒子(LAPs)如:黑碳(BC)、有机碳(OC)以及沙尘(MD)等沉降到积雪上后,会使得积雪反照率减小^[5-7],增加太阳的辐射吸收^[8-9],进而加速积雪

融化,最终影响区域乃至全球的水循环及辐射平衡^[10-13].研究表明,全球冰雪中的 BC 与 MD 的有效辐射强迫大约为+0.13W/m²,可致使地表温度上升 0.4℃左右^[14],而 BC 作为吸光性较强的粒子,其带来的辐射效应不容忽视,同时在气候效应中,BC 的辐射强迫已经对全球变暖过程的贡献中占据很大比重^[15-16].积雪是干旱半干旱地区最重要的水资源,黑碳等气溶胶粒子通过干湿沉降到积雪上后,有效改

收稿日期: 2019-11-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41771470,41661079);新疆维吾尔自治区重点实验室专项基金资助项目(2016D03001);自治区科技支疆项目(201591101)

* 责任作者, 教授, watarid@xju.edu.cn

变积雪反照率,影响辐射平衡,进而影响区域及全球水循环与气候变化.雪粒径(SGS)作为研究积雪中气溶胶粒子辐射效应评估的重要参数,亦是地-气辐射变化的重要变量.

当前,遥感被认为是定量评估积雪物理特性的一种行之有效的工具,而单纯利用遥感手段研究 SGS 大多数集中于定量反演方面,建立了 SGS 与遥感数据的定量关系.其中以球形雪粒形状的辐射传输模型已经广泛应用于 SGS 反演,一些学者也尝试模拟不同 SGS 形状的积雪光谱特征模型,其中以渐进辐射传输模型应用为主^[17-19].SGS 作为模拟积雪中 BC 产生的辐射胁迫的关键中间变量,提高其反演精度,可有效减少辐射强迫的估算误差.然而,目前对于积雪中干湿沉降的气溶胶粒子与 SGS 混合后的积雪反照率变化研究以及如何将单点实测的 SGS 实现尺度转换,进而更精确的与区域模型相结合评估辐射效应研究在干旱区仍较为匮乏,相比全球模式,利用高分辨率的遥感技术与区域物理模型相结合反演 SGS 为此项工作提供一个新思路.由于积雪中存在大量 LAPs,会对积雪反照率产生影响,因此本研究使用基于米散射理论的 SNICAR 模型来获取积雪中污染物的光学特性^[20].现阶段,该模型可输入的 LAPs 的种类较多,包括 BC、MD 等^[5],本研究拟利用遥感宏观技术结合微观反照率机理模型,对积雪中的 BC 气溶胶粒子对积雪反照率与 SGS 进行模拟、反演,为积雪中 LAPs 模式研究提供有效帮助,减小由于模式模拟所导致的结果不确

定性,以期提高积雪中气溶胶粒子对气候产生的辐射胁迫模拟的精度.

积雪作为干旱区水资源的重要来源,是新疆绿洲发展的生命线,对绿洲农业与人口发展均有重要意义.气候的辐射变化会造成积雪融化时间提前或推迟,将会影响地表径流特征与区域水循环,进而导致区域性的干旱化加剧.基于此,本研究于 2018 年 1 月在新疆北疆地区开展了积雪中气溶胶粒子观测实验,主要针对吸光性较强的 BC 气溶胶粒子获取了多种数据参数,结合 MODIS 遥感数据与 SNICAR 模型对新疆积雪反照率及 SGS 进行模拟、反演,为新疆地区辐射胁迫模拟研究奠定基础.

1 研究区概况与数据处理

1.1 研究区概况

新疆位于中国西北部,面积为 166 万 km²,地处干旱半干旱地区,属于典型温带大陆性气候,日照充足,气温年差大,整体降水偏少,年平均降水量为 150mm 左右^[21].新疆北部为阿尔泰山脉,南部为昆仑山系,中部为天山山脉,几乎约有 570 多条河流均发源于三大山脉,其中还包括多条跨国大河流,如伊犁河、额尔齐斯河等,河流的主要补给方式为高山上的冰川与积雪融水^[22].而新疆绿洲又多发育于河流出口、河流沿岸的平原、湖泊以及河流三角洲地区,积雪作为干旱区水资源的主要来源,已然成为新疆绿洲的生命保障,对绿洲农业与经济发展起到至关重要的作用.

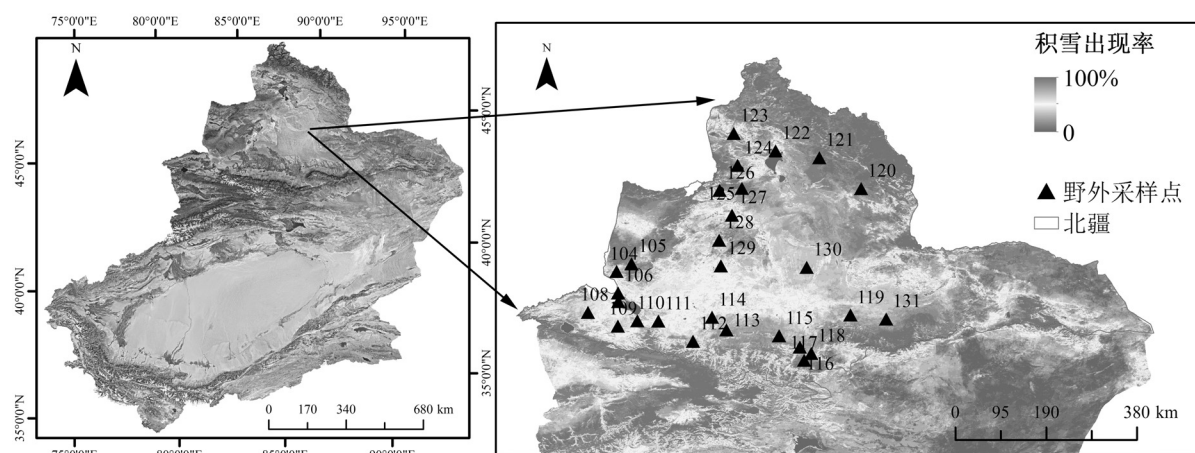


图 1 研究区概况及采样点分布

Fig.1 The image of research area overview and sampling points distribution

“一带一路”重大战略指出,丝绸之路经济带沿

线中的中国新疆地区与中亚地区之间的跨国河流

水资源分配与管理问题是一个重要的研究课题.中国新疆地区与中亚地区同属亚洲中部干旱区,生态环境极其相似,主要水资源均来源于高大山脉的冰雪融水.对中国新疆地区积雪中气溶胶粒子产生的水文与气候效应问题进行深入研究,可有效帮助分析亚洲中部干旱区的水资源利用与决策,更好的服务于我国向中亚西部开放发展的战略^[23].

1.2 野外数据采集

2018年1月在新疆北疆地区开展大范围积雪中气溶胶粒子的观测实验(图2).实验主要集中于艾比湖流域、天山北坡经济带沿线和北部阿勒泰地区,采样点涵盖了荒漠、草原、湖泊、农田等下垫面类型,共得到了28个(104~131)采样点的SGS、雪密度、含水率、温度及BC含量等诸多参数的实验结果,其中,利用国内外采集雪样方法^[24],将样点的积雪按5cm间隔进行分层测量,且论文中的雪粒径的采集与室内计算均为同层样点,对其进行等效粒径测算,获得同等性状数据.由于论文最终针对的是SGS的反演,考虑到尽量减少MODIS混合像元的影响,采样时选择地表高覆盖的积雪地区,样点积雪覆盖率均在85%以上.野外实验使用ASD光谱仪测量实地光谱,每个点通过白板校正,分别测量10次取其平均值.根据Snowfolk积雪特性分析仪与温度计分层获取积雪密度,含水率及温度等,将雪样亦按照5cm间隔使用雪叉对含水率与积雪密度进行测量,在积雪的剖面,每层进行10次测量,取其平均值作为最后结果.同理,使用水银温度计对雪温进行了测量.利用特定积雪采样袋与乳胶手套,获取每个样点的纯净雪样,将其带回室内进行过滤,化验分析,用于积雪中BC含量的测量与计算,并结合小型气象站测量多种气象数据进行辅助分析.

针对SGS的测量,借助高清相机、边长为20cm的方形深色板,将雪样放置在板上10cm²的区域内并对其拍照(图3),将照片导入ArcGIS软件中进行矢量测量,得到样点的SGS,具体处理步骤参考^[25],论文将SGS均作为球形雪粒径进行处理.为保证后续数据获取精度,将采集好的BC雪样置于恒温箱内,对当日雪样进行分析,将雪样迅速溶解于烧杯后,分别过0.4 μ m、0.2 μ m的聚碳酸酯膜,之后使用黑碳积分光谱仪(ISSW)对滤膜进行测量,计算得到雪样中的BC含量,计算原理参考^[16,26].



图2 野外采集雪样

Fig.2 Photographs of collecting snow samples

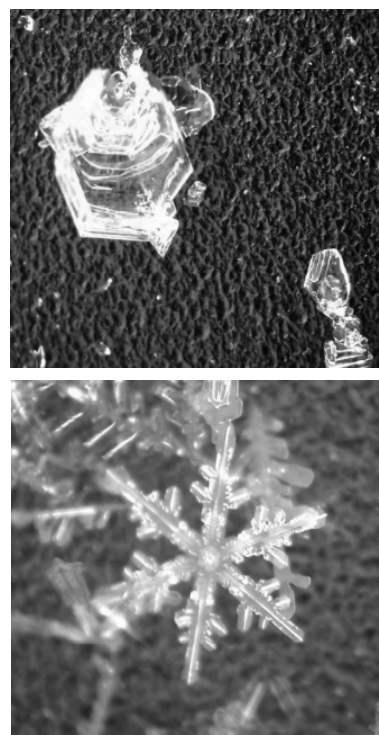


图3 野外实测 SGS

Fig.3 Field measured snow grain size

1.3 遥感数据获取与处理

MODIS 是搭载于 Terra/Aqua 卫星上的光学遥感仪器,提供了从可见光波段到中红外波段的全球观测资料^[27-28],通过 NASA 数据网 <https://modis.gsfc.nasa.gov/> 获取 MODIS 地表反射率数据 MYD09GA, 积雪覆盖数据 MYD10A1、A2、MOD10A1、A2, 土地覆盖数据 MCD12C1 等,选取时间为2017年10月到2018年2月.其中,MOD09GA是通过MODIS Level 1B数据计算得到的7波段产

品,经过大气修正后提供了 500m 分辨率的 7 波段每日反射率数据,该产品为每日过境产品,可与地面实测数据进行匹配.积雪覆盖数据 MYD10A1、A2、MOD10A1、A2 分别为积雪 1d 和 8d 数据产品,使用影像批处理 MRT 工具对其进行拼接、重投影、裁剪等处理,提取了积雪覆盖率等参数.

2 模拟方法与结果分析

2.1 SNICAR 模型

SNICAR 模型是一种国际上通用的模拟积雪反照率的模型,其基于 Wiscombe and Warren 的理论以及 Toon 等的二流、多散射多层辐射传输方案进行估算,适用性已经在大部分地区得到验证.该模型通过计算每一雪层中上行及下行的辐射通量,获取每层积雪反照率的单次反射、衰减光学厚度等光学特性参数,进而很好地模拟积雪反照率、积雪中气溶胶浓度及辐射效应^[29].由于积雪中存在大量 LAPs,会对积雪反照率产生影响,研究使用基于米散射理论模型来获取积雪中污染物的光学特性^[5]. SNICAR 模型主要输入参数如下:太阳入射辐射、太阳天顶角、SGS、雪深、雪密度、雪中 LAPs 含量与下垫面的反照率等,由于野外数据采集的局限性,我们假设 SNICAR 模型中输入的雪粒径均为球形.利用光谱仪实地测量积雪反照率的计算公式如下:

$$\text{Albedo} = \frac{E_{\uparrow}}{E_{\downarrow}} = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 L \cdot R(\xi, \eta, \varphi) \cdot \eta d\eta}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 L \cdot \eta d\eta} \quad (1)$$

式中: $E_{\uparrow}$ 为向上的辐照度; $E_{\downarrow}$ 为向下的辐照度; L 为向下的辐亮度; $R(\xi, \eta, \varphi)$ 表示反射率; ξ, η 分别为入射角及观测角的余弦值; φ 为方位角; 引入朗伯体假设后, R 只与入射角有关, 写为 $R(\xi)$ 则反照率可表示为:

$$\text{Albedo} = \frac{E_{\uparrow}}{E_{\downarrow}} = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 L \cdot R(\xi) \cdot \eta d\eta}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 L \cdot \eta d\eta} \quad (2)$$

$$R(\xi) = \frac{E_{\uparrow}}{E_{\downarrow}} = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 L \cdot \eta d\eta}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 L \cdot \eta d\eta} = R(\xi) \quad (3)$$

2.2 积雪反照率模拟

2.2.1 不同太阳高度角 通过控制 SNICAR 模型其他输入参数, 设置了太阳天顶角从 0° 到 80° 的变化范围, 图 4 为不同太阳高度角条件下的积雪反照率. 由图 4(a) 可以看出, SNICAR 模拟北疆地区积雪反照率的大致趋势为: 随着太阳天顶角的增加积雪反照率也随之增大, 结果显示积雪在 $0.3 \sim 5 \mu\text{m}$ 整个波谱曲线中, $0.3 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 处所对应的反照率变化较大, 这主要是由于光子在雪中传输路径变长, 使其雪粒吸收与散射变大. 光谱曲线中天顶角从 0° 变化到 80° , 可见光波段 600nm 光谱反照率升高了 0.045, 而在近红外波段如 1000nm、1200nm 和 1300nm 处光谱反照率分别升高了 0.16、0.225 和 0.249, 这也和其他相关研究获取的结果较为一致. 在 $0.3 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 波谱范围内, 还可以发现积雪在近红外波段有明显的波谱吸收峰, 在 $1.1 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 、 $1.4 \mu\text{m}$ 与 $1.5 \mu\text{m}$ 处积雪表面的反照率均有一个急剧的下降, 且波谱值降到了 0.1 左右. 除此之外, Wang 等^[30] 在中国东部地区相关研究已经证明在近红外波段太阳天顶角对雪面光谱反照率的影响往往比其他波段表现的更为明显. 图 4(b) 为野外实测的太阳入射辐射变化曲线, 可以看出太阳入射辐射主要集中在可见光的范围, 随着波长增加, 到达地面的太阳辐射越来越少.

2.2.2 不同 SGS SGS 是影响积雪反照率的重要因素, 通过控制其他输入参数, 可模拟不同 SGS 条件下的积雪反照率. 从图 5(a) 可以看出, SGS 的大小相对于太阳入射条件对积雪反照率的影响更明显. 随着 SGS 的增大, 积雪反照率逐渐减少, 这主要是因为 SGS 的增大会使得太阳入射辐射散射到下层的积雪中, 从而太阳辐射会被大量吸收, 导致积雪反照率会随着 SGS 的增大而大大减小. SNICAR 模拟在球形雪粒条件下, 粒径从 $100 \mu\text{m}$ 增加到 $800 \mu\text{m}$ 时, 在 1300nm 处积雪反照率最大可减少 0.35. 与太阳入射条件模拟相似, 在近红外波段, SGS 的大小对积雪的光谱反照率影响也较大, 且相关研究表明, SGS 的大小在近红外波段的反照率起到决定性作用. 但 SGS 增大导致积雪反照率的减少也不是无限制的, 相关研究表明, 当 $\text{SGS} > 1.5 \text{mm}$ 时, 雪密度则成为影响其反照率的主要因素.

图 5(b) 为积分获取的宽波段反照率, 可以看

出,SGS 从 100 μm 到 800 μm ,反照率最大减少 0.15,在 100~300 μm 范围内,反照率减小 0.092,在 400~800 μm 范围内,反照率减小 0.062,100~300 μm 范围反照率减小率明显大于 400~800 μm 范围内,且积雪颗粒越小,SGS 的增加对反照率的减小越显著,可见新雪在最初阶段的老化使其反照率减小更明显.

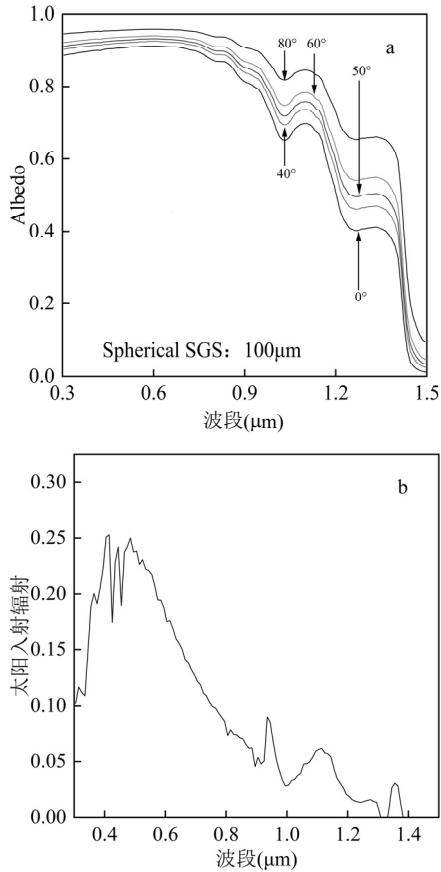


图 4 不同太阳高度角下的积雪光谱
Fig.4 The spectral albedo of snow with different solar zenith angles
(a) SNICAR 模拟不同太阳高度角下的积雪光谱(b)野外实测太阳入射辐射

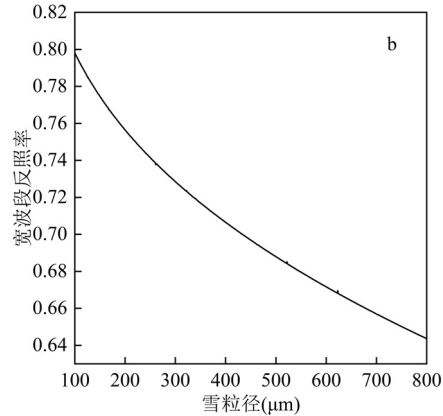
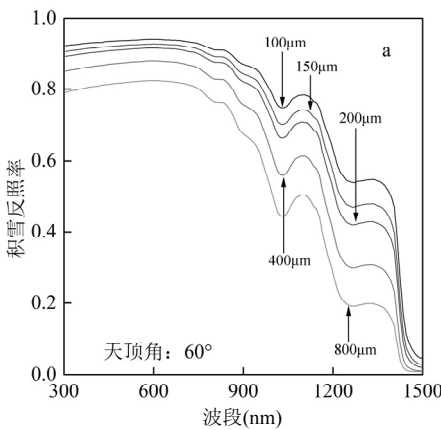
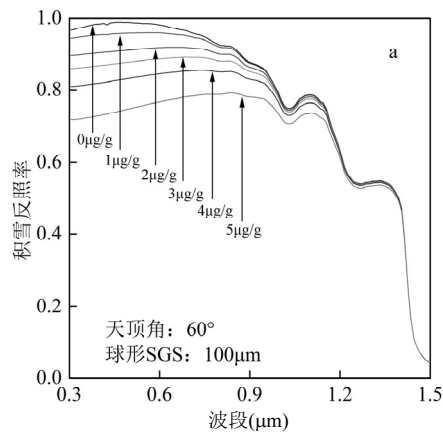


图 5 不同 SGS 下的积雪反照率
Fig.5 The albedo of snow in different snow grain size
(a) 不同 SGS 下的积雪光谱(b)不同 SGS 下的宽波段反照率

2.2.3 不同BC浓度 目前在干旱区积雪中BC的研究较少,研究利用 SNICAR 模型模拟在太阳天顶角为 60°和雪粒径为 100 μm 的条件下,不同BC浓度对积雪光谱反照率的影响(图 6).从图 6(a)可以看出,BC 与模拟 SGS 和太阳入射条件时结论不同,BC 在近红外波段对光谱反照率的影响很小,且各个浓度的 BC 均表现出相似趋势,其影响较大的范围反而主要为可见光波段,5 $\mu\text{g/g}$ 的 BC 浓度只使 800nm、1100nm 处的光谱反照率减小了 0.13 及 0.04,而使 350nm、550nm 处光谱反照率分别减小了 0.25、0.23.从积分得到的宽波段反照率结果来看,不同浓度范围内的 BC,对积雪的反照率的差值也不同,其表现为:随着 BC 浓度的增加,反照率的差值量越来越小,1~2 $\mu\text{g/g}$ 反照率差值可达 0.03,2~3 $\mu\text{g/g}$ 反照率差值为 0.02,3~4 $\mu\text{g/g}$ 反照率差值为 0.018,4~5 $\mu\text{g/g}$ 反照率差值为 0.016,结合理论与实验来看,BC 的吸收主要集中在可见光波段,这与到达地面的太阳辐射能量集中的波段一致,这也是与其他参数指标相比,积雪中的 BC 浓度对地表的辐射平衡会产生显著的影响的原因.



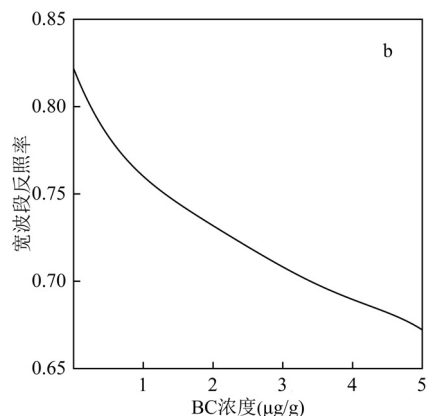


图6 不同条件下的积雪反照率与宽波段反照率

Fig.6 The spectral albedo and spectrally weighted snow albedo indifferent

(a)不同 BC 浓度下的积雪光谱(b)不同 BC 浓度下的宽波段反照率

2.3 SGS 反演流程及结果分析

通过 2.2 对 SNICAR 模型的稳定模拟能力的讨论,论文中使用的 SNICAR 模型与遥感影像进行反演,模型的输入参数如下:背景参数中地表反照率为 MODIS 每日地表反射率,雪深为 2018 年在北疆地区实地测量数据,BC 浓度亦为实测采样点的数据,其他参数,如气溶胶背景场数据取值为北半球的参数场的默认参数.由于积雪反照率在近红外波段受 SGS 主导,受 LAPs 浓度影响很小,而野外实测数据表明,北疆地区季节性积雪中 BC 的含量较高,积雪中的 BC 会严重影响 MODIS 数据 1-4 波段的积雪反射率,因此,研究使用 1240nm (波段 5 的中间波长)处的反射率数据反演 SGS 以确保其反演精度.基于该特性与上述模型模拟的稳定能力分析,利用 SNICAR 模型模拟 BC=0 时,不同太阳天顶角、SGS 的 300 组连续反照率波谱,建立波谱库以便后续模拟对比.由于 MODIS 数据为离散的波段,我们利用 SINCAR 模型模拟的不同组反照率波谱结合 MODIS 数据中确定的太阳天顶角和 1240nm 反照率的波段对比,筛选一组与像元反照率与模型模拟最佳曲线,该曲线的 SGS 值即为该像元模拟的 SGS,同理逐像元反演出区域面状的 SGS 数据.

由于遥感影像中的一些暗目标或过亮目标的存在会严重影响积雪反照率参数的反演,因此本研究反演过程中,首先结合 MCD12C1 地表覆盖类型数据(图 7)对北疆地区的沙漠等过亮以及森林等过暗目标进行掩膜,同时对水体也做掩膜处理,以求得最大限度的剔除影响积雪反照率的地物目标,保证

其反演精度;其次假定下垫面积雪场是单层的半无限积雪场;最后利用 SNICAR 模型模拟多组不同条件下的连续波谱反照率,与 MODIS 数据在 IDL 平台上反演北疆地区面状的 SGS 图.图 8 为 SGS 反演流程图.

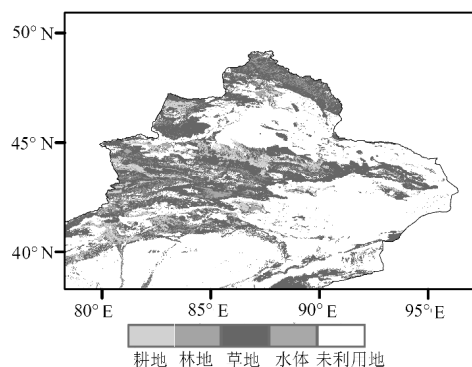


图7 北疆地区土地类型分布

Fig.7 The different land cover types based on MODIS data

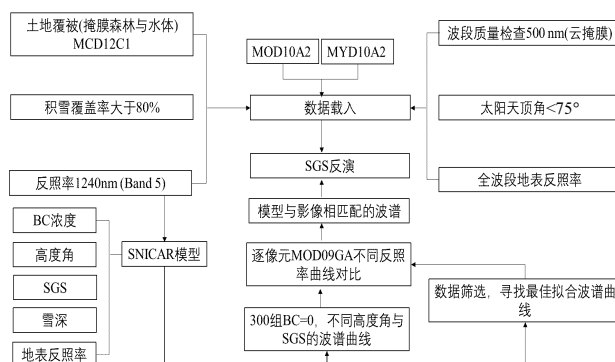


图8 SGS 反演流程

Fig.8 Snow grain size inversion flow chart

图 9 为 SNICAR 模型与 MODIS 数据耦合反演的 SGS 空间分布与区域统计图,通过数理统计结果来看,整个北疆地区 SGS 的平均值为 $241.38\mu\text{m}$,最大值为 $381.2\mu\text{m}$,最小值为 $123.1\mu\text{m}$,最大值出现在艾比湖流域地区,SGS 的高值呈现沿艾比湖流域-天山北坡经济带区域分布特征.

统计数据表明,北疆三个典型区域具有较为明显的差异,艾比湖流域内 SGS 的均值高于整个北疆地区的均值,为 $254.2\mu\text{m}$,而天山北坡经济带、阿勒泰地区的 SGS 的均值均低于整个北疆地区的均值,分别为 $228.7\mu\text{m}$ 、 $197.4\mu\text{m}$.其中,天山北坡经济带区域与艾比湖流域的 SGS 平均高出阿勒泰地区 $57\mu\text{m}$,这表明阿勒泰地区污染物较少,且可能 SGS 粒化程度较快.

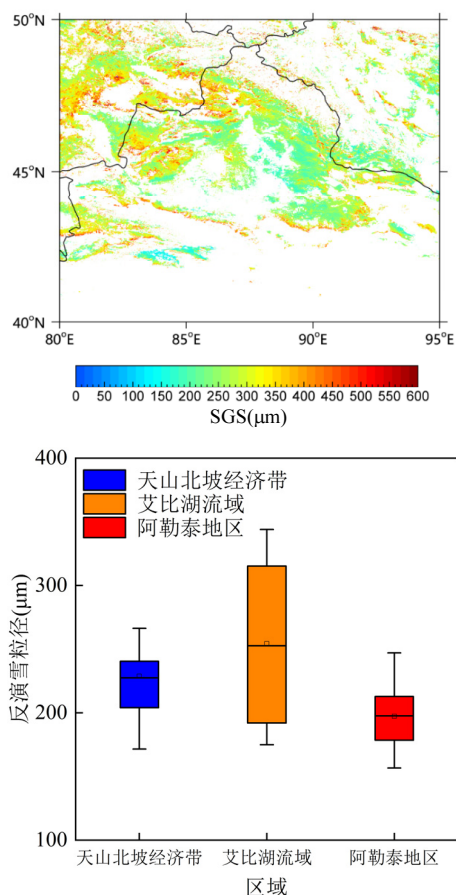


图9 北疆 SGS 反演结果与数理统计图

Fig.9 Inversion results and mathematical statistics of snow grain size in northern Xinjiang

2.4 SGS 精度验证

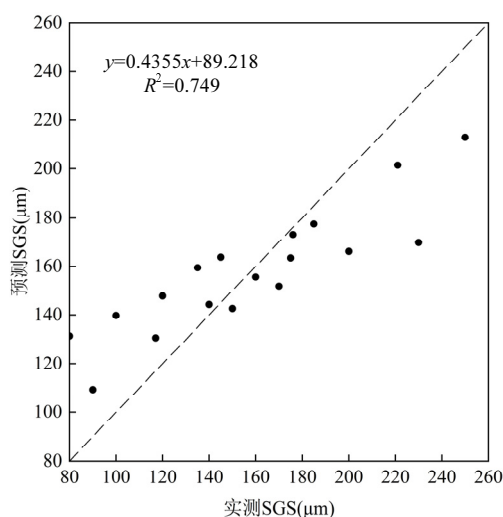


图10 SGS 反演验证结果

Fig.10 The SGS inversion verification results

利用 2018 年 1 月在北疆地区 28 个野外实测的 SGS 数据对北疆 SGS 反演结果进行精度验证,图 10

为反演 SGS 与实测 SGS 验证效果,表明利用 SNICAR 模型结合 MODIS 数据对 SGS 进行反演具有可行性,其精度 $R^2=0.749$.

3 结论

3.1 在不同太阳天顶角条件下,模拟积雪反照率随着太阳天顶角的增大而逐渐增加,其可见光波段反照率升高约 0.045,而近红外波段升高约 0.211,说明太阳天顶角在近红外波段对积雪反照率的影响较其他波段更为明显.

3.2 在不同 SGS 粒径条件下,模拟积雪反照率随着 SGS 的增大而逐渐减小,300μm 以下积雪反照率减小 0.092,400~800μm 反照率减小 0.062,且 300μm 以下反照率减小率比 400~800μm 的高,说明积雪颗粒越小,粒径的增加对反照率的减小越显著.

3.3 在不同 BC 浓度条件下,模拟积雪反照率随着 BC 浓度的增加而逐渐减小,在近红外波段对积雪反照率的影响很小,而对可见光波段影响较为显著,说明 BC 的吸收主要集中在可见光波段.

3.4 利用 SNICAR 模型结合 MODIS 遥感数据反演北疆地区 SGS 数据,并结合野外实测数据对其精度进行验证,分析发现:反演 SGS 与实测 SGS 精度 R^2 可达 0.749,实现了单点 SGS 向面状 SGS 的尺度转换,为积雪气溶胶粒子对区域辐射效应研究奠定了基础.

参考文献:

- [1] Li C, Su F, Yang D, et al. Spatiotemporal variation of snow cover over the Tibetan Plateau based on MODIS snow product, 2001~2014 [J]. International Journal of Climatology, 2018,38(2):708~728.
- [2] Bormann K J, Brown R D, Derksen C, et al. Estimating snow-cover trends from space [J]. Nature Climate Change, 2018,8(11):924.
- [3] Cohen J, Rind D. The effect of snow cover on the climate [J]. Journal of Climate, 1991,4(7):689~706.
- [4] 郭建平,刘欢,安林昌,等.2001~2012 年青藏高原积雪覆盖率变化及地形影响 [J]. 高原气象, 2016,35(1):24~33.
Guo J P, Liu H, An L C, et al. Study on variation of snow cover and its orographic impact over Qinghai-Xizang Plateau during 2001~2012 [J]. Plateau Meteorology, 2016,35(1):24~33.
- [5] Hadley O L, Kirchstetter T W. Black-carbon reduction of snow albedo [J]. Nature Climate Change, 2012,2(6):437~440.
- [6] He C, Liou K N, Takano Y, et al. Impact of grain shape and multiple black carbon internal mixing on snow albedo: Parameterization and radiative effect analysis [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018,123(2):1253~1268.

- [7] He C, Takano Y, Liou K N. Close packing effects on clean and dirty snow albedo and associated climatic implications [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017,44(8):3719–3727.
- [8] Dang C, Warren S G, Fu Q, et al. Measurements of light - absorbing particles in snow across the Arctic, North America, and China: Effects on surface albedo [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017,122(19):10,149–10,168.
- [9] Kaspari S, Painter T H, Gysel M, et al. Seasonal and elevational variations of black carbon and dust in snow and ice in the Solu-Khumbu, Nepal and estimated radiative forcings [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014,14(15):8089–8103.
- [10] Flanner M G, Zender C S, Randerson J T, et al. Present-day climate forcing and response from black carbon in snow [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007,112(D11202):1–17.
- [11] Flanner M G, Zender C S, Hess P G, et al. Springtime warming and reduced snow cover from carbonaceous particles [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009,9(7):2481–2497.
- [12] Painter T H, Deems J S, Belpas J, et al. Response of Colorado River runoff to dust radiative forcing in snow [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010,107(40):17125–17130.
- [13] Qian Y, Gustafson Jr W I, Leung L R, et al. Effects of soot - induced snow albedo change on snowpack and hydrological cycle in western United States based on Weather Research and Forecasting chemistry and regional climate simulations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009,114(D3).
- [14] Bi J, Huang J, Hu Z, et al. Investigating the aerosol optical and radiative characteristics of heavy haze episodes in Beijing during January of 2013 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014,119(16):9884–9900.
- [15] Brandt R E, Warren S G, Clarke A D. A controlled snowmaking experiment testing the relation between black carbon content and reduction of snow albedo [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011,116(D8).
- [16] Grenfell T C, Doherty S J, Clarke A D, et al. Light absorption from particulate impurities in snow and ice determined by spectrophotometric analysis of filters [J]. *Applied Optics*, 2011,50(14):2037–2048.
- [17] Kokhanovsky A A, Zege E P. Scattering optics of snow [J]. *Applied Optics*, 2004,43(7):1589–1602.
- [18] Zege E P, Katsev I L, Malinka A V, et al. Algorithm for retrieval of the effective snow grain size and pollution amount from satellite measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(10):2674–2685.
- [19] 王 杰,黄春林,王 建,等.一种基于光谱库的雪粒径及形状参数反演新方法 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017,37(5):1502–1506.
- Wang J, Huang C L, Wang J, et al. A kind of snow grains and shape parameters retrieval new algorithm based on spectral library [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*. 2017,37(5):1502–1506.
- [20] Toon O B, McKay C P, Ackerman T P, et al. Rapid calculation of radiative heating rates and photodissociation rates in inhomogeneous multiple scattering atmospheres [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1989,94(D13):16287–16301.
- [21] 胡汝骥,樊自立,王亚俊,等.近 50a 新疆气候变化对环境影响评估 [J]. *干旱区地理*, 2001,24(2):97–103.
- Hu R J, Fang Z L, Wang Y J, et al. Assessment about the impact of climate change on environment in Xinjiang since recent 50 years [J]. *Arid Land Geography*, 2001,24(2):97–103.
- [22] 陈晓娜,包安明.天山北坡典型内陆河流域积雪年内分配与年际变化研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2011,25(6):154–160.
- Chen X N, Bao A M. Snow cover change in Manasi River Basin during 2007 and 2008, 1960 and 2006 [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011,25(6):154–160.
- [23] 刘卫东.“一带一路”战略的科学内涵与科学问题 [J]. *地理科学进展*, 2015,34(5):538–544.
- Liu W D. Scientific understanding of the Belt and Road Initiative of China and related research themes [J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(5):538–544.
- [24] Wang X, Pu W, Ren Y, et al. Observations and model simulations of snowalbedo reduction in seasonal snowdue to insoluble light-absorbing particles during 2014 Chinese survey [J]. *Atmospheric and Physics*, 2017,17(3):2279–2296.
- [25] 陈 冲,刘志辉,张 波,等.一种测量积雪粒径的新方法 [J]. *安徽农业科学*, 2013,41(25):10395–10398.
- Chen C, Liu Z H, Zhang B, et al. A new method to measure the snow grain size: A case of Juntanghu Watershed [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013,41(25):10395–10398.
- [26] Doherty S J, Warren S G, Grenfell T C, et al. Light-absorbing impurities in Arctic snow [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010,10(23):11647–11680.
- [27] Gabbi J, Huss M, Bauder A, et al. The impact of Saharan dust and black carbon on albedo and long-term mass balance of an Alpine glacier [J]. *The Cryosphere*, 2015,9(4):1385–1400.
- [28] 陈文倩,丁建丽,张 喆,等.新疆干旱区季节性积雪中黑碳气溶胶研究 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(1):83–91.
- Chen W Q, Ding J L, Zhang Z, et al. Black carbon in seasonal snow across northern of Xinjiang [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(1):83–91.
- [29] Munneke P K, van den Broeke M R, Lenaerts J T M, et al. A new albedo parameterization for use in climate models over the Antarctic ice sheet [J]. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 2011, 116:D05114.
- [30] Wang X, Doherty S J, Huang J. Black carbon and other light-absorbing impurities in snow across Northern China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013,118(3):1471–1492.

作者简介: 曹肖奕(1994-),男,新疆哈密人,新疆大学硕士研究生,主要从事干旱区环境遥感应用方面的研究。