

# 积雪与气溶胶粒子混合的光谱反照率模拟研究

陈文倩<sup>1,2</sup>, 丁建丽<sup>1,2\*</sup>, 王鑫<sup>3</sup>, 浦伟<sup>3</sup>, 张喆<sup>1,2</sup>, 石腾龙<sup>3</sup>

1. 新疆大学资源与环境科学学院智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046
2. 绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046
3. 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000

**摘要** 积雪中的黑碳气溶胶粒子会导致积雪光谱反射率显著下降, 进而引起的气候辐射变化会推迟或提前积雪融化时间, 严重影响了干旱区地表径流特征、区域水循环过程, 由此引起的干旱区生态水文问题也越来越受到关注。2018年1月在新疆北疆地区开展积雪中气溶胶粒子观测实验, 借助 ASD 地物光谱仪、Snow Folk 积雪特性仪与 HR-1024 外场分光辐射度计等仪器获取原始积雪光谱数据与其他积雪参数, 应用 Snow, Ice, and Aerosol Radiation model (SNICAR) 模型模拟了不同雪粒径下、不同太阳天顶角、不同 Black Carbon (BC) 浓度下的积雪光谱反照率变化状况, 讨论了 BC、雪粒径在不同光谱范围内敏感性, 结果表明: 太阳天顶角对雪面光谱反照率的影响在近红外波段比其他波段表现得更明显, 在积雪光谱曲线中太阳天顶角从 0° 变化到 80°, 可见光波段 600 nm 处光谱反照率升高了 0.045, 近红外波段 1 000, 1 200 和 1 300 nm 处光谱反照率分别升高了 0.16, 0.225 和 0.249; 在天顶角为 60° 时, 雪粒径从 100 μm 增大到 800 μm, 对应的光谱反照率减少量最大可达到 0.15, 且 100~300 μm 范围内的雪粒径比 400~800 μm 范围内的引起光谱反照率的下降量明显增大, 雪粒径的增大能使吸光性颗粒物的光吸收效应增强; 随着 BC 浓度的增加, 积雪反照率会显著下降, 且不同浓度的 BC 对积雪的反照率的差值不同, 随着 BC 浓度的增加, 反照率的差值量越来越小。不同的 BC 浓度在近红外波段对光谱反照率影响较小, 影响较大的范围主要集中在可见光波段, 在光谱 800 和 1 100 nm 处, 5 μg·g<sup>-1</sup> 的 BC 浓度使光谱反照率减小了 0.13 和 0.04, 5 μg·g<sup>-1</sup> 的 BC 可使 350 与 550 nm 处的光谱反照率减小 0.25 与 0.23; 比较不同粒径下, BC 浓度对积雪光谱宽波段反照率的减少情况可发现, 在 BC 存在的情况下, 雪粒径的增加会增大 BC 的光吸收效应, 且浓度越高, 吸收增加的越多; 从光谱指数角度表明 BC 在可见光波段 350~740 nm 比较敏感, 相关系数较高; 雪粒径在近红外波段 1 100~1 500 nm 比较敏感, 尤其在 1 000 与 1 300 nm 左右, BC 与雪粒径在积雪光谱曲线中的敏感波段相关性都较高, R<sup>2</sup> 高达 0.9 以上; 最后将模型模拟的积雪反照率与实测数据进行验证对比, R<sup>2</sup> 为 0.738, 模拟效果较好, 可为干旱区积雪光谱反照率的研究奠定数据基础。

**关键词** 干旱区; 积雪光谱反照率; 黑碳; 雪粒径; 光谱指数

**中图分类号:** P426.63 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)02-0446-08

## 引言

积雪是冰冻圈的重要组成部分, 季节性积雪覆盖了地球陆地 30% 以上的面积, 直接影响着大气温度、地表反射率与土壤湿度等, 进而影响地-气系统的辐射平衡。

地物光谱特征是遥感技术的物理基础, 也是遥感应应用研

究的理论依据。目前在国内外对地物光谱特征研究中, 涉及范围越来越多, 包括土壤、水体、植被以及冰雪等领域。地物光谱反射率是指某一波段向一定方向的反射, 光谱反照率则是反射率在所有方向上的积分, 而各波长处光谱反照率的积分又称为宽波段反照率, 相对于其他自然地表, 积雪光谱反照率较高, 对外界因素的变化更为敏感, 对气候的影响也更为显著<sup>[1]</sup>。

**收稿日期:** 2018-12-12, **修订日期:** 2019-04-16

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41771470, 41961059), 自治区科技支疆项目(201591101)和新疆大学优秀博士生科技创新项目(XJUB-SCX-2016014)资助

**作者简介:** 陈文倩, 女, 1988年生, 新疆大学资源与环境科学学院博士研究生 e-mail: chimmyqu@yeah.net

\* 通讯联系人 e-mail: watarid@xju.edu.cn

目前,干旱区季节性积雪与气溶胶粒子产生的混合光谱问题研究不多,有报道在中国东北地区开展了类似研究。而干旱区独特的地貌、下垫面类型与脆弱的生态环境,使得此问题在气候与水文效应中更加敏感,二者的混合光谱反射率相比纯雪显著下降,进而导致的气候辐射强迫问题,开始得到关注。辐射强迫是一种度量,反映了某个因子对地球-大气系统入射与逸出能量平衡影响程度的改变情况,揭示了这个因子对潜在气候变化机制中的重要作用。具体表现为:辐射正强迫会使得地球表面增暖,负强迫使其降温。

积雪粒子的吸收系数随着波长变化而变化,由于其在可见光波段与红外波段的吸收强弱不同,会导致积雪在可见光波段的反照率较高,对应其吸收程度,在红外波段表现出相反的状态<sup>[2]</sup>。纯雪的反照率主要受雪粒径、形状与厚度等参数以及当时的太阳天顶角的影响,而当气溶胶粒子通过干湿沉降降到积雪表面,与雪粒径通过内外混合,其在可见光波段的吸收迅速增加使得积雪光谱反照率明显地减小<sup>[3]</sup>。由此表明,积雪中的吸收性粒子的含量不仅能减少积雪反照率,也可用来反映区域与全球范围内人类活动对环境的污染等问题。雪中常见的气溶胶粒子包括黑碳(black carbon, BC)、沙尘、有机碳等,由于 BC 比雪中其他颗粒物的吸光性要高,对积雪光谱影响较大,研究人员着重在 BC 方面做了大量的野外采集进行研究<sup>[4-5]</sup>,实验开展地主要包括北极、南极、格陵兰岛、青藏高原与北美西部等地。有相关研究指出当积雪场的粒半径为  $1\ 000\ \mu\text{m}$  时,  $10\ \text{ng}\cdot\text{g}^{-1}\text{BC}$  可使  $400\ \text{nm}$  处的积雪光谱反照率减小约  $0.01$ <sup>[6]</sup>。Hansen 指出 BC 的影响使得北极地区积雪光谱反照率减小了  $1.5\%$ ,通过模式模拟研究,BC 使全球冰雪光谱反照率减小了  $0.4\%$ ,而使得北半球平均减少  $1\%$ <sup>[7]</sup>。而当 BC 包含在气候模式中时,其造成的积雪光谱反照率的减少会导致气候正的辐射强迫,在一定程度上会加剧全球和区域气候变暖过程<sup>[8-9]</sup>。

积雪作为新疆干旱区水资源的主要来源,气候的辐射变化会导致积雪融化时间提前或推迟,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。目前针对新疆大面积季节性积雪与 BC 的混合光谱观测目前较为缺乏,开展系统综合观测实验研究 BC 对积雪光谱反照率与干旱区气候

的影响十分必要。

现阶段对于积雪光谱反照率的模拟计算,研究人员结合物理模型和一些经验参数建立了一些模型<sup>[10]</sup>。开展相关模拟研究较多的是在假定雪粒是球形的条件下,基于辐射传输理论对积雪反照率进行模拟计算。SNICAR(snow, ice, and aerosol radiation model)模型是基于 Toon 等的二流、多散射及多层辐射传输方案来计算每一雪层中向上和下的通量<sup>[11]</sup>,可结合多种积雪参数获取高精度的积雪反照率,可应用于模拟冰雪表面反照率。

2018 年 1 月在新疆北疆地区开展的积雪中气溶胶粒子观测实验,获取了多种积雪参数,利用 SNICAR 模型反演积雪光谱反照率,模拟不同粒径下、不同太阳天顶角、不同 BC 浓度下的积雪光谱反照率变化状况,亦为新疆干旱区积雪中气溶胶粒子产生的辐射胁迫模拟研究奠定基础。

## 1 实验部分

### 1.1 研究区概况

新疆属干旱半干旱地区,是“一带一路”的重要通道,深处亚-欧大陆腹地,气候表现为典型温带大陆性特征。由于地理位置原因,地处内陆,使得区域气温温差较大,但常年日照时间充裕,其远离海洋,水汽不易到达,整体降水量偏少,年平均降水量为  $150\ \text{mm}$  左右,且区域降水量差异性较大。下垫面类型为山地与盆地相间排列,北部为阿尔泰山系,天山横亘于中部,南部为昆仑山系,山脉之间为两大盆地,新疆作为五大雪区之一,永久性冰川主要存在于三大山脉高海拔地区。

“一带一路”重大战略指出丝绸之路经济带沿线中亚中部干旱区(中国新疆地区与中亚地区之间)的跨国河流水资源问题,亚洲中部干旱区自然环境相似,也是全球陆地系统中气候较为脆弱地带,河流均以帕米尔高原与天山等高大山系积雪融水为主,水资源是此区域发展的重要限制性因素,怎样更好地有效利用与管理干旱区水资源已成为一个重要课题。新疆约有 570 多条河流,包括多条跨国大河流,如伊犁河,额尔齐斯河(流经哈萨克斯坦)。新疆绿洲又多发育于出

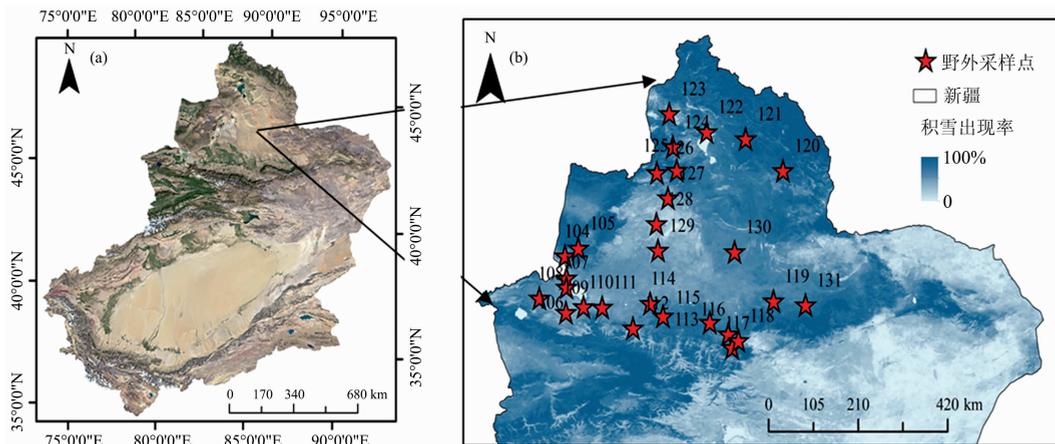


图 1 研究区及采样点

Fig. 1 The image of study and samples

山口河流沿岸的平原、湖泊与河流三角洲地区, 积雪干旱区是绿洲的生命线[见图 1(a,b)], 对绿洲农业与经济发展均有极其重要的现实意义。

### 1.2 雪样采集与处理

2018年1月8日—1月22日在北疆地区开展大范围积雪中气溶胶粒子的观测实验, 见图 2(a)。实验主要集中于艾比湖流域、天山北坡经济带沿线与北部阿勒泰地区, 途经乌鲁木齐、石河子、精河、阿拉山口、托里、克拉玛依、北屯等县市, 共得到了 28 个(104~131) 采样点的积雪粒径、密度、含水率、温度及吸收性气溶胶含量等诸多参数的实验结果。整个采样过程涵盖了荒漠、草原、湖泊、农田等下垫面类型, 使用仪器包括 ASD 地物光谱仪、Snow Folk 积雪特性仪与 HR-1024 型外场分光辐射度计等, 见图 2(b)。

采样点设计为距城市 50 km, 距离道路或铁路至少 1 km



图 2 实测积雪光谱数据

Fig. 2 Measured spectral of snow in field

### 1.3 遥感数据处理

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(0.4  $\mu\text{m}$ )到中红外波段(14  $\mu\text{m}$ )的全球观测资料。实验利用 2001 年—2018 年 MODIS 积雪覆盖数据, 计算了干旱区积雪出现率图, 如图 1(a,b)中北疆地区地图所示。

### 1.4 SNICAR 模型

SNICAR(snow, ice, and aerosol radiation model)模型是一种广泛应用于模拟冰雪表面反照率的模型。该模型基于二流、多散射及多层辐射传输方案来计算每一雪层中向上和下的通量, 从而得到吸收参数和表层光谱反照率。需要计算每一层雪在波段处的光学特性: 衰减吸收参数、表层光谱反照率、衰减厚度、单次散射反照率和不对称因子。同时雪层中每种杂质都拥有各自的光学特性, 其通过米散射理论模型计算得到。SNICAR 模型的输入参数包括: 入射辐射, 太阳天顶角, 每一雪层的雪粒有效半径, 每一雪层中杂质的含量, 下垫面的光谱反照率, 反照率的计算公式如式(1)

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

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;  $\xi$  和  $\eta$  分别为入射角及观

的上风处。采集两个雪样的垂直剖面, 分别收集雪样, 取其平均值, 以减少可能受到人为影响的污染。由于北疆地区此次降雪普遍较少, 采集的雪样大部分以表层参数为主。整个实验过程中, 雪样一直保持冷冻直到开始过滤, 分别在奎屯市、乌鲁木齐市、吉木乃县的宾馆设立临时实验室, 对采集的雪样进行过滤处理。首先将雪样迅速融化, 把融化的雪水静置 3~5 min, 使用 0.4  $\mu\text{m}$  的滤膜进行过滤雪水, 然后将过滤前与过滤后的雪水均进行保存处理, 用于进一步的化学分析。实验使用 ISSW 分光光度计分析过滤样品中的 BC, 首先利用一组标准滤膜, 将测量的吸收转换为滤膜上的 BC 质量, 然后通过测量滤膜的载荷面积和过滤的雪水质量, 将滤膜上的 BC 质量转换为雪中的 BC 浓度。进而计算得到等效 BC 浓度。

测角的余弦值;  $\varphi$  为方位角; 引入朗伯体假设后,  $R$  只与入射角有关, 写为  $R(\xi)$  则反照率可表示为式(2)和式(3)

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

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

### 1.5 积雪光谱反照率的实地测量

在野外用 ASD 地物光谱仪与 HR-1024 分光辐射度计测量了 19 个站点的积雪光谱反射率, 波长测量范围处于 350~2 500 nm 之间。测量时, 观测者面朝太阳, 用三脚架将仪器固定, 并放在离测量目标大约一米的位置, 外接电脑, 由人为操控测量。对于一个标准的反射白板, 从可见光到红外区的反射率为 0.98。表层雪和标准板的反射率至少要测量 10 次, 目前大多数研究将雪面作为朗伯体来处理, 野外测量得到的光谱反射率在数值上可直接当做光谱反照率来处理。

已有研究证明, 在外场实验中用分光辐射度计测量的积雪在 350~2 200 nm 波段的反射率, 通过对反射率进行校正与积分, 获得相应的宽波段积雪反照率, 将其与地表辐射网测量的真值相比, 精度较高, 达到使用精度。目前的光谱测

量装置中,分光辐射计被认为是在野外实验中短时间内进行反射率测量较实用的,在寒冷地区几乎也不受影响。这类装置主要的优点是波长测量范围广,同时在波长 320 nm 处,太阳天顶角小于 85°时其余弦误差也将小于 5%,精度较高。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SNICAR 模型模拟结果分析

#### 2.1.1 太阳光入射条件对积雪光谱的影响

图 3(a)可以看出模型模拟北疆地区积雪的光谱反照率大致趋势为随着太阳天顶角的增大而增加,模型设置了太阳天顶角从 0°变化到 80°的范围,结果显示积雪在 0.3~5 μm 整个波谱曲线中,0.3~1.5 μm 处所对应的光谱反照率变化较大,这很大一部分原因是由于光子在雪中传输路径变的较长,使其雪粒吸收与散射变大。除此之外,Wang<sup>[1,3]</sup>在中国东部地区相关研究已证明太阳天顶角对雪面光谱反照率的影响在近红外波段比其他波段往往会表现的更为明显。图 3(b)为野外实测的太阳入射辐射曲线情况,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。光谱曲线中天顶角从 0°变化到 80°,可见光波段 600 nm 光谱反照率升高了 0.045,而在近红外波段如 1 000, 1 200 和 1 300 nm 处光谱反照率分别升高了 0.16, 0.225 和 0.249,也与其他相关研究获取的结果较为一致。在

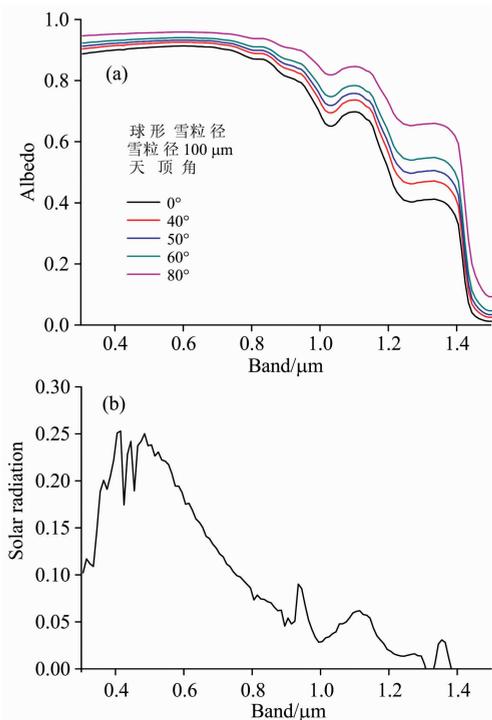


图 3 不同高度角下的积雪光谱

(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

Fig. 3 The spectral albedo of snow with different solar zenith angles

(a): Simulated by SNICAR in different solar zenith angles;  
(b): Solar radiation by field measured

0.3~1.5 μm 波谱范围内,发现积雪在近红外波段有明显的波谱吸收峰,在 1.1~1.2, 1.4 与 1.5 μm 处雪面的光谱反照率均有一个急剧的下降,且光谱强度值降到了 0.1 左右。

#### 2.1.2 不同雪粒径下对积雪光谱反照率的影响

从图 4(a)可以看出雪粒径的大小相对于太阳入射条件对积雪反照率的影响更明显。随着雪粒径的增大,积雪反照率的减少越显著,这主要是因为雪粒径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,导致积雪的反照率的减少量随着雪粒径的增大而大量减小。模型模拟在球形雪粒条件下,粒径从 100 μm 增加到 800 μm 时,在 1 300 nm 处积雪反照率减少量最大可达到 0.35。与太阳入射条件模拟相似,在近红外波段,雪粒径的大小对积雪的光谱反照率影响也较大,且相关研究也表明:在近红外波段积雪反照率,雪粒径起到决定性作用,但这种减少并不是无限制的,当雪粒径 > 1.5 mm 时,雪密度则成为影响其反照率的主要因素。

图 4(b)为积分获取的宽波段反照率,可以看出,雪粒径为 100~800 μm,反照率减少量最大可达到 0.15,且 100~300 μm 范围,反照率的下降量为 0.092,400~800 μm 处,反照率的下降量为 0.062,斜率要明显大于 400~800 μm 处,并且积雪颗粒越小,粒径的增加对反照率的减小影响越显著,可见新雪在最初阶段的老化使其反照率减小更明显。

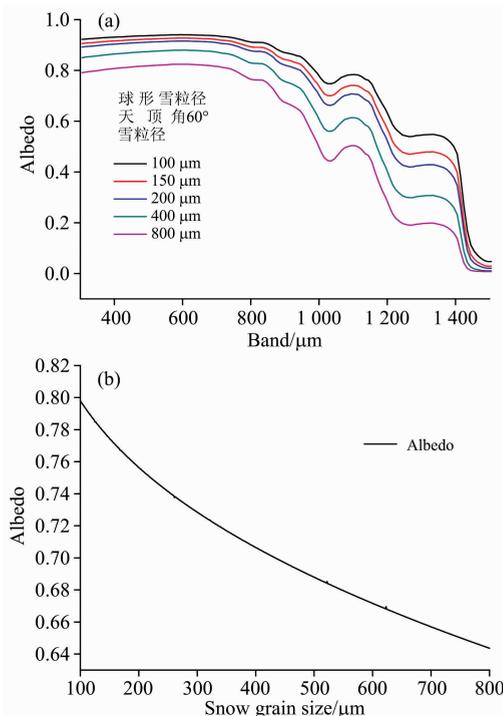


图 4 不同雪粒径下的积雪反照率

(a): 不同雪粒径下的积雪光谱;(b): 不同雪粒径下的宽波段反照率

Fig. 4 The albedo of snow in different snow grain size

(a): The spectral of snow in different snow grain size;  
(b): Spectrally weighted snow albedo for different snow grains size

#### 2.1.3 不同浓度 BC 对积雪光谱反照率的影响

目前在干旱区积雪中 BC 的研究较少,我们利用 SNIC-

AR 模型模拟在太阳天顶角为  $60^\circ$  和雪粒径为  $100 \mu\text{m}$  的条件下, 不同 BC 浓度对积雪光谱反照率的影响(图 5)。从图 5(a)可以看出, BC 与模拟雪粒径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, 在  $800$  和  $1100 \text{ nm}$  处,  $5 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  的 BC 浓度只使光谱反照率减小了  $0.13$  和  $0.04$ , 而在可见光波段 BC 对光谱反照率的影响则十分显著,  $5 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  的 BC 可以使  $350$  与  $550 \text{ nm}$  处的光谱反照率减小  $0.25$  与  $0.23$ 。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, 趋势为随着 BC 浓度的增加, 见图 5(b), 反照率的差值量越来越小, BC 浓度  $1 \sim 2 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  反照率差值可达  $0.03$ , BC 浓度  $2 \sim 3 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  反照率差值为  $0.02$ , BC 浓度  $3 \sim 4 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  反照率差值为  $0.018$ , BC 浓度  $4 \sim 5 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  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, 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。

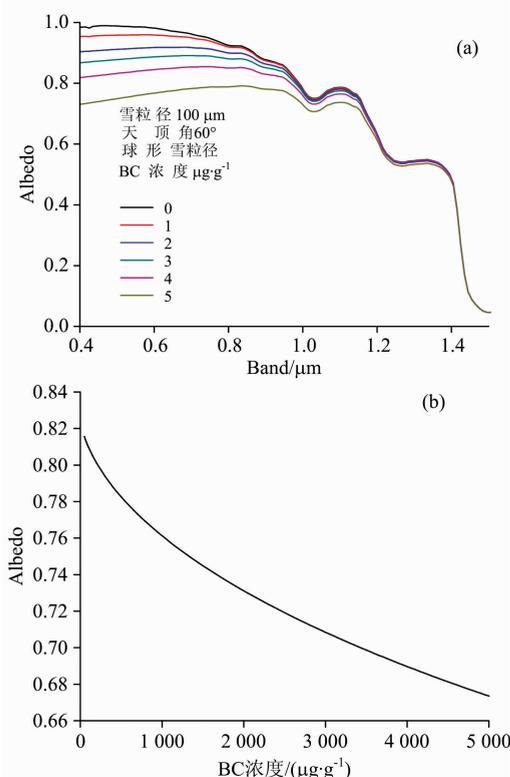


图 5 不同条件下的积雪反照率与宽波段反照率  
(a): 不同 BC 浓度下的积雪光谱;  
(b): 不同 BC 浓度下的宽波段反照率

Fig. 5 The spectral albedo and spectrally weighted snow albedo indifferent

(a): Spectral of snow in different concentration of BC;

(b): Spectrally weighted snow albedo for different concentration of BC

在分析了不同浓度下 BC 对积雪反照率的影响后, 模型在假定太阳天顶角为  $60^\circ$ , 雪粒子为球形的条件下, 模拟了

不同雪粒径时干旱区典型 BC 浓度对积雪宽波段反照率的影响。如图 6 所示, 比较不同粒径下, BC 浓度对积雪宽波段反照率的减小情况可以发现, 在有 BC 存在的情况下, 雪粒径的增加会加大 BC 的光吸收效应, BC 浓度越高, 这种吸收增加的越多。低浓度下, 雪粒径为  $50 \sim 800 \mu\text{m}$  时反照率减少量最大为  $0.133$ ,  $0.6 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  反照率减少量可达  $0.217$ ,  $1 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  差值可达  $0.24$ ,  $2 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  差值可达  $0.28$ ,  $3 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  差值为  $0.3$ ,  $4 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  差值  $0.32$ ,  $5 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  差值为  $0.34$ , 在雪粒径为  $50 \sim 400 \mu\text{m}$  条件下 BC 造成积雪宽波段反照率的减少量范围在  $0.1179 \sim 0.4580$ 。从模拟结果也可看出, 在老化的积雪中, 颗粒物的光吸收效应更为显著, 对积雪反照率的影响也更大。

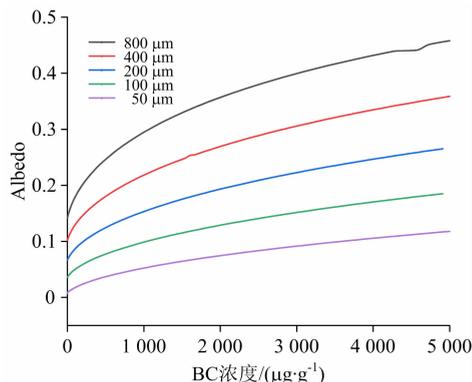


图 6 太阳天顶角为  $60^\circ$  时, 不同雪粒径下 BC 浓度变化对模拟的积雪宽波段反照率减少量的影响

Fig. 6 The spectrally weighted snow albedo reduction attributed to BC for the solar zenith angle of  $60^\circ$

## 2.2 BC 与雪粒径不同光谱指数下敏感性分析

为了进一步分析 BC、雪粒径对积雪光谱的影响, 将 SNICAR 模拟的积雪光谱, 进行光谱指数运算, 光谱范围为  $350 \sim 1500 \text{ nm}$ , 将光谱指数存入二维矩阵, 然后与 BC、雪粒径实测值计算相关系数, 最终得出基于 NDI 和 RI 的积雪中 BC、与雪粒径相关的光谱矩阵系数图, 如图 7 所示。

NDI 指数

$$\text{NDI} = (r_i - r_j) / (r_i + r_j) \quad (4)$$

式(4)中,  $r_i$  和  $r_j$  随机选取第  $i$  和  $j$  波段的积雪光谱反射率。

RI 指数

$$\text{RI} = r_i / r_j \quad (5)$$

式(5)中,  $r_i$  和  $r_j$  随机选取第  $i$  和  $j$  波段的积雪光谱反射率。

图 7(a) 和 (b) 为 BC 与二维光谱指数相关性, (a) 为 BC 与 NDI 指数相关图, 基于此矩阵系数图, 相关性较高区域主要在  $350 \sim 740$  和  $940 \sim 1140 \text{ nm}$ , 最佳估算参数为 ( $600 \text{ nm}$ ,  $680 \text{ nm}$ ), 最大相关系数为  $-0.992$ 。(b) 为基于 RI 的光谱矩阵系数图, 与 NDI 分布大致相似, 相关性较高的区域也主要在  $350 \sim 600$  和  $940 \sim 1140 \text{ nm}$ , 最佳估算参数与 NDI 一致, 最大相关系数为  $-0.993$ , 两种光谱指数只在  $1140 \text{ nm}$  后有部分差异, 其余波段表现较为一致。图 7(c) 和 (d) 为雪粒径与二维光谱指数相关性, (c) 为雪粒径与 NDI 指数相关图, (d) 为雪粒径与 RI 指数相关图, 二者均表明, 雪粒径与积雪

光谱正相关性较高的区域主要在 1 100~1 500 nm，其中在 1 000 与 1 300 nm 处左右，负相关系数可达到 0.940。将实测 BC 与雪粒径与 SNICAR 模拟的光谱曲线进行相关光谱指数分析可知，BC 在可见光波段 350~740 nm 比较敏感，相关

系数较高；雪粒径在近红外波段 1 100~1 500 nm 比较敏感，尤其在 1 000 与 1 300 nm 左右，相关系数较高，研究结果表明，从二维光谱指数这个视角来看，BC 与雪粒径在积雪光谱上表现也与其他研究结果一致<sup>[12]</sup>。

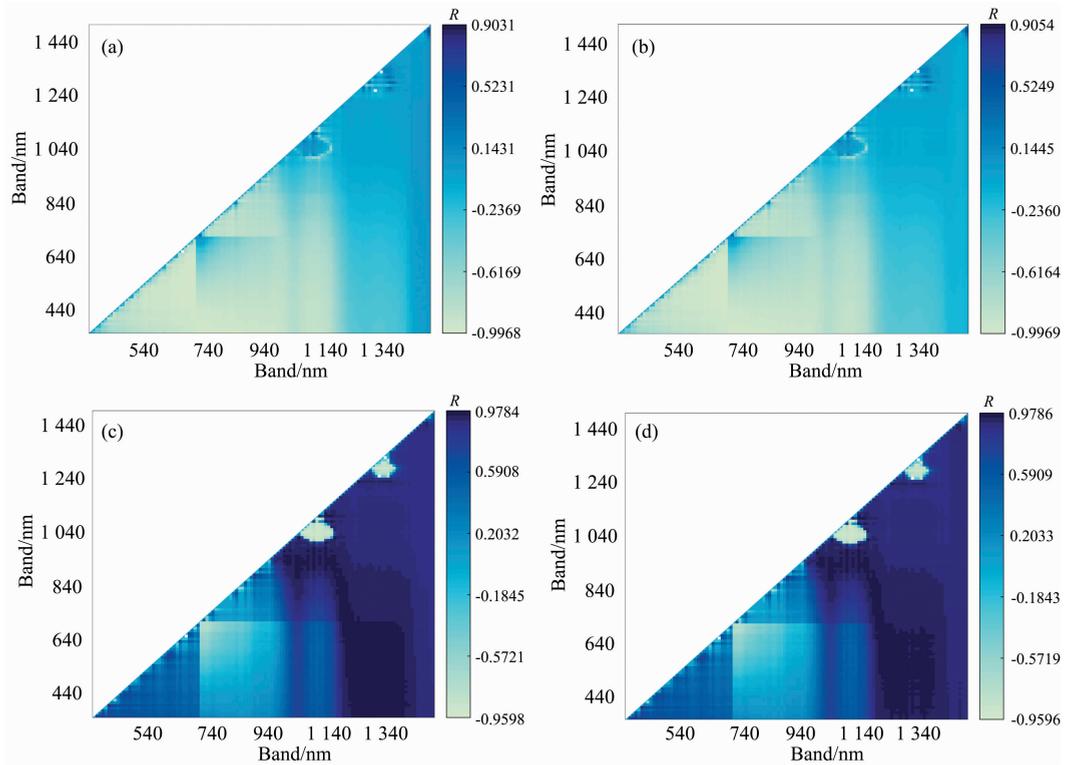


图 7 积雪光谱指数与 BC、雪粒径相关性

(a): BC 与 NDI 相关性; (b): BC 与 IR 相关性; (c): 雪粒径与 NDI 相关性; (d): 雪粒径与 RI 相关性

Fig. 7 Spectral matrix coefficients of spectral albedo and BC, snow size

(a): Coefficient of BC and NDI; (b): Coefficient of RC and IR; (c): Coefficient of snow size and NDI; (d): Coefficient of snow size and RI

### 2.3 实测反照率与模拟结果分析

利用 2018 年 1 月 8 日至 22 日在晴空条件下，使用 ASD 与 HR-1024 实地测量的分光辐射度计测量的 12 个站点的积雪光谱反射率数据对模拟数据进行验证。将雪面作为朗伯体来处理<sup>[13]</sup>，反射率近似为光谱反照率，基于太阳光谱在 0.3~1.5  $\mu\text{m}$  波段对光谱反照率权重积分后得到积雪宽波段反照率。将其与用 SNICAR 模式模拟得到的积雪宽波段反照率进行比较，结果如图 8 所示，实测积雪反照率与模拟值相关性较好， $R^2$  为 0.738，对于旱区积雪光谱反照率的预测效果较好，结果也表明模拟得到的积雪反照率与实测反照率在某些站点低浓度 BC 处较为一致，而在一些站点高浓度 BC 时模拟的反照率要比实测的反照率大，差值可以达到 0.1 左右，类似研究结果表明在高浓度 BC 处相比积雪有效粒径采用有效粒径范围时与实测积雪反照率更加一致。

## 3 结 论

为探究新疆干旱区季节性积雪中气溶胶粒子对积雪光谱反照率的影响，借助 ASD 地物光谱仪、Snow Folk 积雪特性

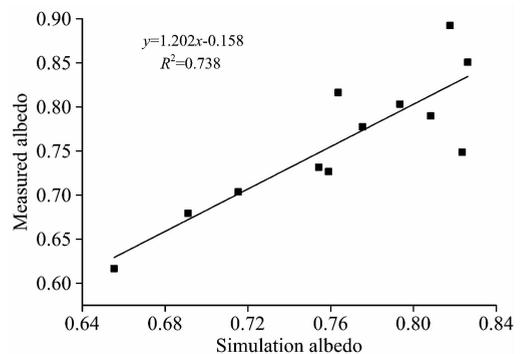


图 8 实测与模拟值对比

Fig. 8 Comparison of simulation with measured albedo of snow

仪与 HR-1024 型外场分光辐射度计获取 2018 年 1 月 8 日—22 日原始积雪光谱与其他参数数据，利用 SNICAR 模型模拟了不同条件下的新疆北疆地区季节性积雪光谱反照率曲线，并将其与实测反照率数据进行验证，结论如下：随着天顶角的增加，积雪光谱反照率增大，不同波段增加幅度不同；雪粒径为 100~800  $\mu\text{m}$  时，积雪反照率减少量最大可达

到 0.35, 从积分获取的宽波段反照率来看, 反照率减少量最大可达到 0.15, 且积雪颗粒越小, 粒径的增加对反照率的减小影响越显著; 在可见光波段 BC 对光谱反照率的影响十分显著,  $5 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  的 BC 可以使 350 与 550 nm 处的光谱反照率减小 0.25 与 0.23。从积分得到的宽波段反照率结果来看, 随着 BC 浓度的增加, 反照率的差值量越来越小,  $1 \sim 2 \mu\text{g} \cdot$

$\text{g}^{-1}$  反照率差值可达 0.03,  $4 \sim 5 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  反照率差值为 0.016; 将实测 BC 与雪粒径与 SNICAR 模拟的光谱曲线进行相关光谱指数分析可知, BC 在可见光波段 350~740 nm 比较敏感, 雪粒径在近红外波段 1 100~1 500 nm 比较敏感; 最后将实测积雪反照率与模拟值进行拟合, 相关性较好,  $R^2$  为 0.738。

## References

- [ 1 ] Wang X, Xu B, Ming J. Journal of Meteorological Research, 2014, 28(3): 354.
- [ 2 ] YANG Yu, ZHANG Tian-tian, LI Jun-hui, et al(杨 玉, 张甜甜, 李军会, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(12): 3743.
- [ 3 ] Wang X, Doherty S J, Huang Jianping. Journal of Geophysical Research, Atmospheres, 2013, 118(3): 1471.
- [ 4 ] Wang X, Pu W, Ren Y, et al. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17(3): 2279.
- [ 5 ] Bond T C, Doherty S J, Fahey D W, et al. J. Geophys. Res-Atmos., 2013, 118(11): 5380.
- [ 6 ] Wright P, Bergin M, Dibbj, et al. Remote Sensing of Environment, 2014, 140: 118.
- [ 7 ] Zhang R, Jing J, Tao J, et al. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(14): 7053.
- [ 8 ] Painter T H, Bryant A C, Mckenzie Skiles S. Geophysical Research Letters, 2012, 39(17): 17502.
- [ 9 ] Pu W. Aerosol & Air Quality Research, 2015, 15(6S): 2212.
- [10] Lin G, Penner J E, Flanner M G, et al. J. Geophys. Res-Atmos., 2014, 119(12): 7453.
- [11] He C L, Liou K N, Takano Y, et al. J. Geophys. Res-Atmos., 2018, 123(D19): 1253.
- [12] Zhang Y, Kang S, Sprenger M, et al. Cryosphere, 2018, 12(2): 413.
- [13] Pu W, Wang Xin, Wei Hailun, et al. Cryosphere, 2017, 11(3): 1.

## Simulation of Spectral Albedo Mixing of Snow and Aerosol Particles

CHEN Wen-qian<sup>1, 2</sup>, DING Jian-li<sup>1, 2\*</sup>, WANG Xin<sup>3</sup>, PU Wei<sup>3</sup>, ZHANG Zhe<sup>1, 2</sup>, SHI Teng-long<sup>3</sup>

1. Xinjiang Common University Key Lab of Smart City and Environmental Stimulation, Xinjiang University, Urumqi 830046, China
2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046, China
3. Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change, Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

**Abstract** Aerosol particles of Black carbon in the snow cause a significant decrease in the albedo spectrum of the snow, which results in climatic radiation changes seriously, and will delay or advance the snow melting time, badly affecting the characteristics of surface runoff and processes of water cycle in the arid region. This problem is receiving increasing attention in ecological hydrology issues in the arid region. The data of field measurement were obtained by ASD spectrometer, Snow Folk and HR-1024 external field spectrum radiometer. SNICAR model was used to simulate the snow spectrum spectral characteristics under different parameters. Discussed the sensitivity of BC and snow particle size in different spectral ranges. The results showed that: In the snow spectral curve, the zenith angle changes from  $0^\circ$  to  $80^\circ$ , the albedo at 600 nm in the visible spectrum increases by 0.045, and the albedo at 1 000, 1 200 and 1 300 nm in the near-infrared band increases by 0.16, 0.225 and 0.249, respectively. The zenith angle is at  $60^\circ$ , when snow particle size increases from 100 to 800  $\mu\text{m}$ , the albedo reduction can reach 0.15, and snow particle size in the range of 100~300  $\mu\text{m}$  is significantly higher than the albedo in the range of 400~800  $\mu\text{m}$ . And the increase of the snow particle size can enhance the absorption effect of the light spectrum absorbing particles; Different BC concentrations have little effect on the spectral albedo in the near-infrared region, but are mainly concentrated in the visible light band. At 800 and 1 100 nm, the BC concentration of  $5 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  reduces the spectral albedo by 0.13. The BC of  $5 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  can reduce the spectral albedo at 350 and 550 nm by 0.25 and 0.23. Compared with the different snow sizes, the decrease of BC concentration on the broad-band albedo of snow spectrum can be found in BC. In the case of the increase in the particle size of the snow, the light absorption effect of BC is increased, and at the higher concentration, the more the absorption increases; from the spectral index, the BC is sensitive in the visible light range of 350~740 nm, and the correlation coefficient is higher; The snow size is sensitive

in the near-infrared band 1 100~1 500 nm, especially around 1 000 and 1 300 nm. The correlation between BC and snow particle size in the sensitive band of the snow spectral curve is high. Finally, the snow albedo simulated by the model is compared with the measured data. The  $R^2$  is 0.738, and the simulation effect is good. It can lay a data foundation for the study of the snow albedo in the arid region.

**Keywords** Arid zone; Snow spectral albedo; Black carbon; Snow particle size; Spectral index

\* Corresponding author

(Received Dec. 12, 2018; accepted Apr. 16, 2019)

## 第 21 届全国分子光谱学学术会议暨 2020 年光谱年会 (第二轮通知)

由中国光学学会和中国化学会主办的“第 21 届全国分子光谱学学术会议”暨由中国光学会光谱专业委员会主办的“2020 年光谱年会”将于 2020 年 5 月 15—18 日在成都召开,会议由四川大学分析测试中心承办。本次大会将秉承前 20 届分子光谱学学术会议之宗旨,以期形成自由研讨的学术氛围,让光谱相关或相近的思想撞击出火花,期待颠覆性创新创造力泉涌。

### 一、会议简要日程安排

2020 年 5 月 15 日

全天注册报到

16:00—18:00 组织委员会和学术委员会会议;《光谱学与光谱分析》编委会会议

2020 年 5 月 16 日

08:30—12:00 开幕式、大会报告

14:00—18:00 大会报告

2020 年 5 月 17 日

08:30—12:00 分组邀请报告和口头报告

14:00—18:00 分组邀请报告和口头报告

2020 年 5 月 18 日

08:00—12:00 大会报告及闭幕式

### 二、学术报告

本次会议将采用邀请报告和申请口头报告相结合的形式,同时也将开设青年论坛和墙报展示。组委会对青年学者、博士和硕士研究生等设立优秀论文奖(包括优秀口头报告和墙报),届时将组织专家进行评选。

#### 2.1 邀请报告

已经确认参加会议并作大会报告的院士及国内外著名学者:

李 灿 院士 中国科学院大连化学物理研究所

陈洪渊 院士 南京大学

田中群 院士 厦门大学

孙世刚 院士 厦门大学

谭蔚泓 院士 湖南大学

张 锦 院士 北京大学

邀请报告信息将陆续更新,请大家关注会议主页浏览相关信息:

<http://www.sinospectroscopy.org.cn/meeting/index.php?mid=24>

#### 2.2 口头报告

会议将开放一定数量的口头报告,大家可以自由申请,申请方式为在会议注册系统中提交口头报告题目(在口头报告栏目),并在会议截稿日期前通过会议稿件提交系统按要求提交论文摘要,申请截止日期为 2019 年 12 月 30 日。

#### 2.3 青年论坛

对于青年学者,博士和硕士研究生可以申请青年论坛报告,申请办法和截止日期与口头报告相同,组委会将组织专家进行优秀报告评选,并颁发优秀论文证书和奖金。

(下转 453 页)