

湖冰双向反射特征的现场观测研究

于 森¹, 卢 鹏^{1*}, 曹晓卫¹, 汤明光¹, 王庆凯¹, 李志军^{1,2}

1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000

摘 要 冰面反照率是用来研究寒区水域大气和水体之间能量交换的重要参数, 可以通过遥感数据反演得到。但是卫星遥感观测的波长和角度都相对固定, 而且视场角有限, 因此获得的表面反射率并不等价于反照率, 还需要根据下垫面情况进行各向异性校正。冰的前向散射很强, 而且光学性质对其物理参数非常敏感, 因此不同物理性质的冰在不同方向上的反射率也有很大的差异, 给冰面反照率的反演带来了不确定性。为了解决这些问题, 2019年2月在内蒙古乌梁素海湖对五种性质各异的冰进行了光学性质的现场观测, 测量类型包括: (I) 阴天不均匀气泡冰; (II) 表层有大量泥沙的冰; (III) 稀疏大气泡冰; (IV) 致密小气泡冰; (V) 融化冰, 并对彼此之间的反照率、双向反射因子(BRDF)以及各向异性反射因子(ARF)光谱特征的差异进行对比分析。结果表明: 随着太阳天顶角的增大, 除融化冰的反照率出现了下降以外, 其余冰面反照率都出现不同程度的增大。冰的双向反射特征呈现出明显的各向异性, 在前向散射方向会形成一个反射的峰值点, 该点的位置会受冰表情况的影响, 而峰值点以外方向上的反射光主要来自冰内体散射, 这部分对观测的天顶角不敏感, 而对方位角的敏感性在短波段会受到冰内部组分均匀程度的影响, 在长波段几乎不受影响。在对冰的BRDF谱线分析时发现, 冰的体散射谱线形状和反照率谱线很相似, 但是在长波段的减小速度更快, 即体散射在短波段能量更加集中, 而在前向散射方向接近反射峰值点位置上, 能量在长波段更加集中, 短波段较少。分析ARF谱线可以发现, 冰的体散射对反照率的贡献随波长的增大而减小, 而冰表面反射情况相反。更重要的是各测量点的ARF谱线的大小顺序和BRDF谱线的顺序并不相同, 说明即使在观测角度一致时, 不同冰的反照率反演参数并不相同。

关键词 湖冰; 现场观测; 双向反射因子; 各向异性反射因子

中图分类号: P343.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)08-2453-09

引 言

湖泊在温度降低到冰点以下后水面会形成冰层, 由于冰的高反射和低热传导能力使得大气和水体之间的能量和物质交换受到了影响^[1]。太阳短波辐射是冰层生消的主要能量来源, 了解冰对短波辐射的反射特性对评估冰内能量传输及其生消过程有着重要的意义。反照率是量化冰面反射太阳辐射能力的重要参数, 随着气温的升高, 冰表面开始融化变暗, 反照率会随之减小, 冰层会吸收更多的太阳辐射促进冰的进一步融化^[2], 这种正反馈作用是冰厚快速减小的重要原因, 如何实时连续地获取冰区反照率成为了一个急需解决的问题。

近年来遥感技术为湖冰的观测提供了有力的支持, 通过遥感数据获得冰面反照率是现阶段获得大范围连续数据的唯一方法。反照率表示下垫面对太阳辐射在半球空间内的反射率, 即各个方向上反射的总能量与入射能量之比。目前从光学卫星遥感可以获得多通道^[3]和固定观测天顶角^[4]下的下垫面反射率数据, 而太阳天顶角的变化也会对反射率产生影响^[5]; 对于冰这种非朗伯体下垫面, 无法通过一个特定方向的反射率反演其他方向的反照率信息, 限制了遥感数据在冰区的应用。

解决上述问题需要对冰的双向反射因子(BRDF)有深入了解, 它表示表面特定方向上反射的辐亮度与入射的辐照度之比, 是一个可以量化反射光场的各向异性程度的物理量。

收稿日期: 2019-07-08, **修订日期:** 2019-11-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA0605901), 国家自然科学基金项目(41876213, 51579028), 冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201604), 中央高校基本科研业务费(DUT19LAB08), 博士后创新人才支持计划项目(BX20190051)资助

作者简介: 于 森, 1993年生, 大连理工大学港口、海岸及近海工程专业博士研究生 e-mail: yumiao2411@mail.dlut.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: lupeng@dlut.edu.cn

Arnold^[6]对北极海冰进行航空观测,发现融雪会对其双向反射特征带来很大影响。Charles^[7]对北极海冰和雪进行航空观测,发现在73°太阳天顶角下,除前向散射方向的散射明显增强,其余方向的散射接近各向同性。Jin^[8]等使用 AVHRR 的遥感数据和辐射传输模型分析了雪和冰的双向反射特征,模型讨论了表面粗糙度的影响。Aleksy^[9]提出了一种专用于白冰的模型,根据冰表散射层的光学厚度和有效粒径来估算白冰的双向反射特征。Perovich^[10]用现场数据分析了北极融冰期冰、雪和融池的双向反射特征随天顶角和方位角的变化。有报道现场测量渤海的三种海冰,分析了双向反射特征对天顶角和方位角的敏感性。

从以上研究中可以看到,国内外对双向反射的研究以海冰为主,对湖冰的研究较少,而且主要是通过辐射传输模型、遥感等非现场测量方法,缺少与冰的类型或物理性质的

联系。本研究为了明确不同类型湖冰反射特征的区别,分析了反照率光谱及双向反射光谱随光照环境和观测角度的变化规律,为湖冰的定量遥感提供可供参考的现场数据。

1 实验部分

现场试验地点为内蒙古乌梁素海湖,测量时间为2019年2月17日至22日,日气温在-14~2℃之间变化,处于冰消融初期,冰厚在33~54 cm范围内。为考察不同类型冰的反射特性,试验选取了图1和表1所示五个不同特征的测点进行观测,观测时天气环境稳定,并对每个测点都进行了反照率及双向反射特征的观测。为体现不同太阳天顶角的影响,每个测点测量两次,间隔约30 min。

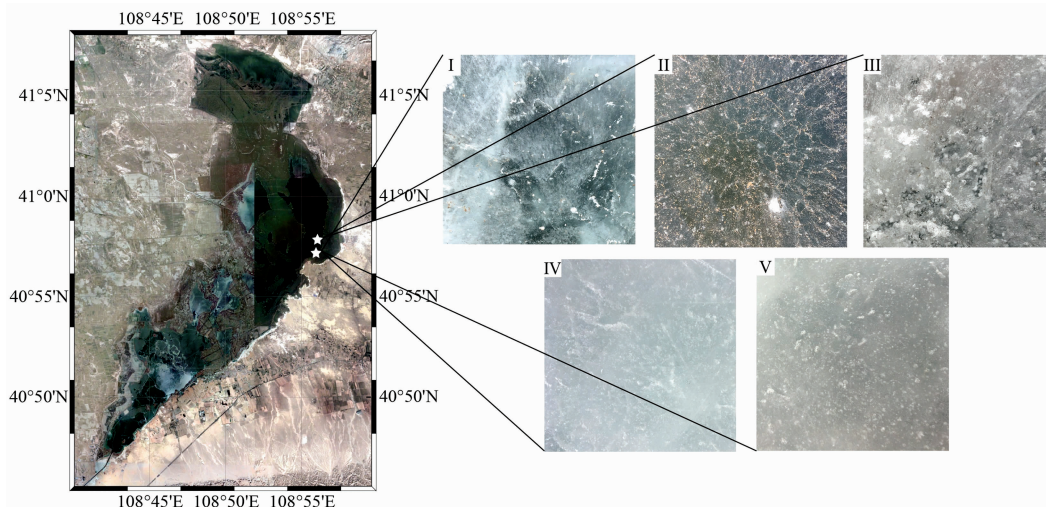


图1 内蒙古乌梁素海湖冰试验地点(左侧底图为谷歌地图卫星影像)

Fig. 1 Experiment site in Wuliangsu Lake (Base map on the left is a satellite imagery from Google map)

表1 观测点信息

Table 1 Information of observed site

序号	日期	天气	冰厚/cm	观测天顶角/(°)	表现性质
I	2-17	阴	53.1	56.5, 62.1	冰面表层泥沙很少,而且由于周围冰裂缝的存在导致内部气泡分布很不均匀
II	2-19	晴	33.8	56.6, 63.5	整体透明,有极少量垂向均匀气泡,表层有大量泥沙
III	2-20	晴	34.5	56.7, 62.9	冰内含有大量大尺寸气泡,表面无明显泥沙
IV	2-21	晴	52.5	58.6, 65.2	冰内由于含有大量致密气泡而呈白色,表层无明显泥沙
V	2-22	晴	51.8	57.4, 64.0	冰内有大量致密气泡,整体呈白色,表层无明显泥沙,且表面已经融化

图2为主要试验设备,观测仪器为德国 TriOS 研制的 RAMSES 光谱仪,包括两个辐照度传感器和一个辐亮度传感器,其中辐照度传感器装配有余弦收集器,可以接收到半球空间内各个方向的光;辐亮度传感器则只能接收一定立体角内的光,空气中的视场角为7°。两类传感器的测量光谱范围为320~950 nm,是太阳短波辐射能量的集中区,也可覆盖主要卫星数据的可见光和近红外波段。测量光谱的分辨率为(3.3±0.3) nm,积分时间为4 ms~8 s由仪器自动调整。

图2(a)中旋转支架上的辐亮度传感器可以在半圆形天顶弧上滑动以改变观测天顶角 θ_r ,天顶弧也可以在圆盘底座滑动以改变观测方位角 φ_r ,且天顶弧是偏心安装,既可以保证其影子不会落到传感器视场内影响结果也不会带来其他误差。

根据双向反射因子 BRDF 的定义[式(1)]

$$f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{dE_i} = \frac{L_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{E_i} \quad (1)$$

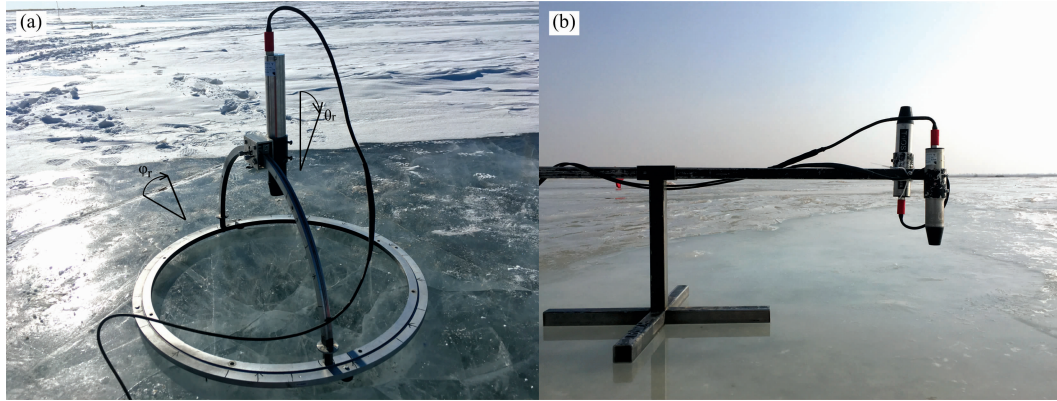


图 2 试验装置

(a): BRDF 测量设备; (b): 反照率测量设备

Fig. 2 Experimental setup

(a): BRDF; (b): Albedo

式(1)中, θ_i 和 φ_i 分别为入射光的天顶角和方位角, θ_r 和 φ_r 分别为反射光的天顶角和方位角, L_r 为反射辐亮度, E_i 为入射辐照度, λ 为观测波长。实际测量中, 先用图 2(a) 旋转支架测量不同方位角和天顶角的辐亮度 L_r , 天顶角从 0° (天底方向) 到 60° 每 20° 测量一次, 后向散射的天顶角记为负值, 并将后向散射方向的方位角定义为 0° , 可以将 BRDF 表达式中的 φ_i 省略掉, 方便分析, 从 0° 到 330° 每 30° 测量一次, 再用图 2(b) 传感器测量实时下行辐照度, 可以减少由于入射光的细微变化给结果带来的影响。最后移走旋转支架, 用图 2(b) 辐照度传感器测量该处的反照率。一次测量约 20 min, 在此时间段内太阳方位角和天顶角变化约为 $2^\circ \sim 3^\circ$, 其影响可以忽略不计。

为了便于不同反照率目标之间的对比以及反照率的反演, 引入各向异性反射因子(ARF)。它是某方向反射率在半球内的积分值与实际反照率的比, 可以量化相应位置的反射

率对反照率的贡献。其表达式为式(2)

$$R_i(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{\pi L(\theta_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{F_u} = \frac{\pi f(\theta_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{\alpha} \quad (2)$$

式(2)中, F_u 为半球光通量, $f(\theta_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)$ 为双向反射因子 BRDF, α 为反照率, 其表达式为式(3)

$$\alpha = \frac{\int_{2\pi} L_r \cos\theta_r d\Omega}{E_i} = \frac{M_r}{E_i}$$

式(3)中, M_r 为反射辐照度, Ω 为立体角。

2 结果与讨论

2.1 反照率

图 3(a, b) 所示为五个测点不同天顶角的反照率谱线, 在现场观测中很难保证不同日期测量时的太阳天顶角保持完全

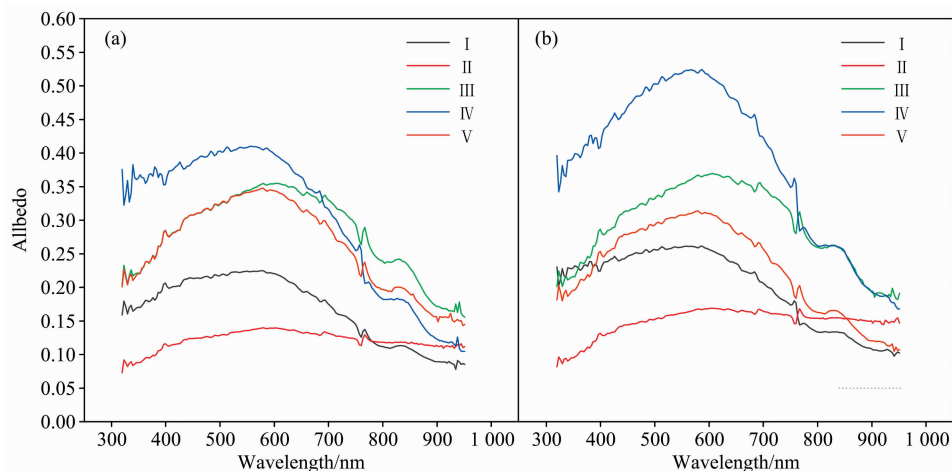


图 3 反照率

(a): $\theta_i = 56.5^\circ \sim 58.6^\circ$; (b): $\theta_i = 62.1^\circ \sim 65.2^\circ$

Fig. 3 Spectral albedo

(a): $\theta_i = 56.5^\circ \sim 58.6^\circ$; (b): $\theta_i = 62.1^\circ \sim 65.2^\circ$

一致, 此处对比的天顶角差异约为 $2^\circ \sim 3^\circ$, 可忽略其对定性结论的影响。图中各点的光谱峰值均出现在 $550 \sim 600 \text{ nm}$ 之间, IV号冰的反照率最高, 峰值略高于 0.4; II号冰的反照率最低, 峰值约为 0.1。因为冰内的散射主要发生在气泡边界^[11], IV号冰中存在大量致密的气泡, 增强了冰内体散射, 因此反照率较大。而II号表层的泥沙对短波段反照率的影响要超过深层杂质^[12], 在 $300 \sim 600 \text{ nm}$ 波段, 泥沙的吸收系数远大于冰, 使反照率明显降低, 随着波长增加冰的吸收系数增大, 泥沙的吸收系数减小^[13], 二者共同作用下形成了II号反照率在长波段缓缓下降的现象。I, V号冰和IV号厚度相近, I号为阴天测量, 云层的存在会增加漫射光的比例, 冰的反照率会有少量增加, 但相比于IV号和V号含有大量气泡的白冰, 反照率仍然较小。而V号冰表层的融化水膜吸收了大量太阳辐射导致反照率降低^[14]。III号冰和II号厚度相近, 由于气泡的影响反照率较大。

随着太阳天顶角的增大, 光线入射更加接近于冰表面, 增大了发生散射的概率^[11], 因此图 3(b)的反照率除V号冰外都有不同程度的增大。V号冰的小幅度的下降是因为融化冰中的液态水对光的吸收更加充分, 超过了天顶角变化产生

的影响。

2.2 双向反射因子 BRDF

为了应对遥感数据的角度限制, 需要了解 BRDF 的空间分布特征。主平面是经过待测点位置与入射光平行的面, 是反射光场变化最明显的部分。图 4 给出了主平面内不同波段 BRDF 值与观测天顶角的关系。除II号冰的反射峰值出现在 $\theta_r = 20^\circ$ 附近以外, 其余测点在 $\theta_r \leq 40^\circ$ 的反射强度相差很小, 反射峰值都出现在 $\theta_r = 60^\circ$ 附近。对比图 4(a)和(b)可以发现, 后向散射的反射率在 850 nm 波段更加接近, 这是因为后向散射的光主要来自冰内的体散射^[11], 而在长波段下冰的吸收系数变大^[14], 冰内的体散射减弱, 冰表面反射占据优势。放大图 4(a)可以看到, 后向散射反射率中IV号和V号较大, II号最小, 这是因为IV号和V号冰内含有大量致密的气泡, 体散射较强, 而II号冰透光性很好, 体散射较弱。对比图 4(a), (c), 可以看到后向散射反射率值基本不变, 说明冰内体散射对太阳天顶角的变化不敏感。II号冰的反射峰值点从 20° 迅速变到 60° 附近, 是由于冰表面的粗糙程度受到了泥沙的影响而改变了冰表面反射峰值点的位置和范围^[8]。

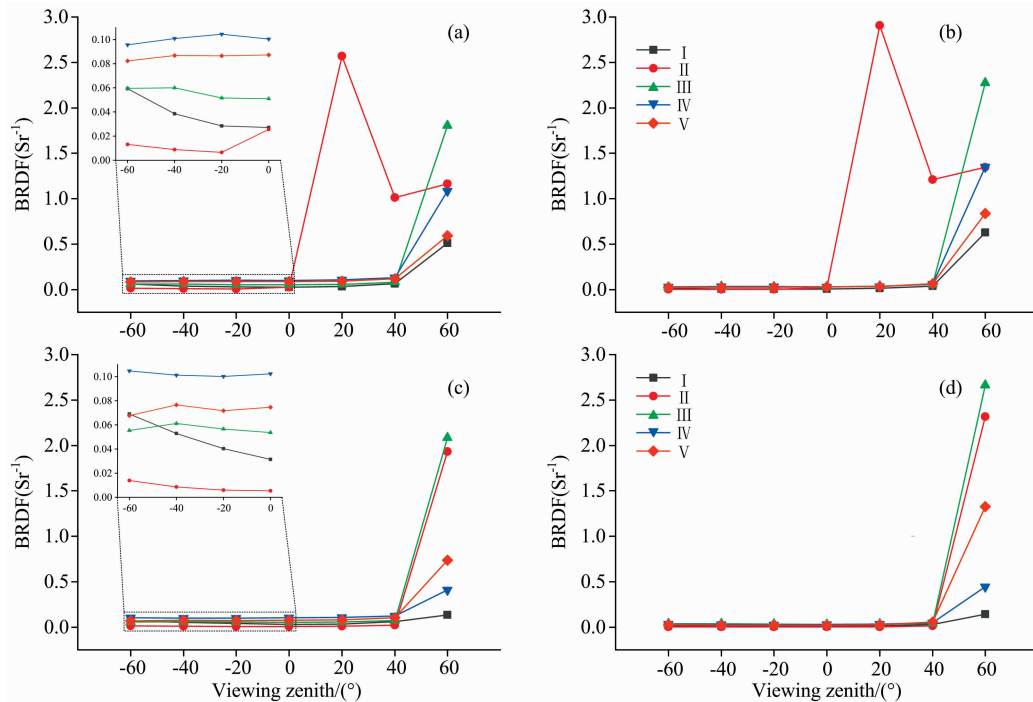


图 4 主平面双向反射因子 BRDF

(a), (c): $\lambda = 450 \text{ nm}$; (b), (d): $\lambda = 850 \text{ nm}$; (a), (b): $\theta_i = 56.5^\circ \sim 58.6^\circ$; (c), (d): $\theta_i = 62.1^\circ \sim 65.2^\circ$

Fig. 4 BRDF of principal plane

(a), (c): $\Theta = 450 \text{ nm}$; (b), (d): $\lambda = 850 \text{ nm}$; (a), (b): $\theta_i = 56.5^\circ \sim 58.6^\circ$; (c), (d): $\theta_i = 62.1^\circ \sim 65.2^\circ$

图 5 为不同波段的 BRDF 值与观测方位角的关系, 从 (a)和(b)可以看到 $\theta_r = 20^\circ$ 时, 反射率对方位角不敏感, 而且图 5(a)中反射率值与图 4(a)中后向散射的值几乎保持一致。只有 I 号和 V 号较为特殊, 其中 I 号冰是内部性状的不均匀导致了体散射不均匀, V 号冰在 $\varphi_r = 0^\circ$ 和 330° 反射率较低, 是由于融化产生的水膜增加了冰表面反射的比例, 降低了后

向散射的能量。两个特殊现象在 850 nm 波段都被削弱, 说明了在非反射峰值天顶角上, 冰的反射率对方位角的敏感性主要取决于冰内的体散射, 内部性状均匀的冰对方位角很不敏感。

对比图 5(a)和(c), 首先可以看到虽然(c)图中观测天顶角变大, 在 $\varphi_r \approx 180^\circ$ 出现了散射峰值点, 但在其他方向角下

的反射率与(a)图及图 4(a)和(c)差距很小,这一点在(b), (d)图对比中也明显可见,说明了接近散射峰值的天顶角下,除峰值点以外其他方位角的反射率对方位角也不敏感。结合对图 4 的分析可将结论扩展到整个观测空间内($\theta_r \leq 60^\circ$),前向散射方向的某个天顶角下会出现一个散射的峰值点,该点

的方向和反射率取决于冰表面情况,而散射峰值点以外的部分主要来自冰内体散射,其性质接近于各向同性,在短波段会受到冰内性状均匀性的少量影响,在长波段几乎不受太阳天顶角和观测方向的影响。

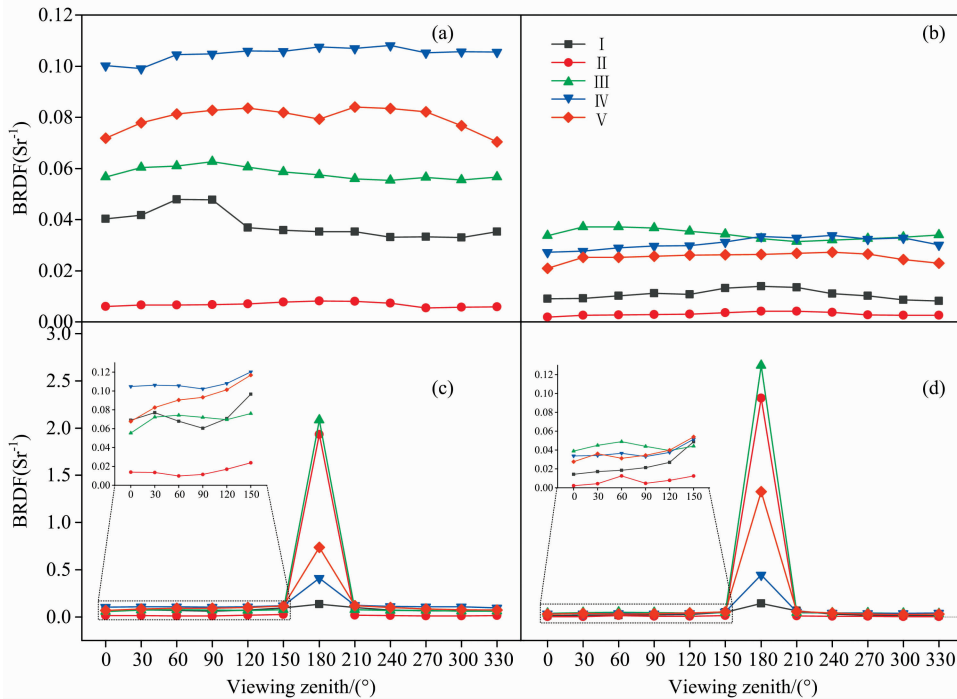


图 5 各方位角双向散射因子 BRDF

(a), (c): $\lambda=450 \text{ nm}$; (b), (d): $\lambda=850 \text{ nm}$; (a), (b): $\theta_r=20^\circ$; (c), (d): $\theta_r=60^\circ$

Fig. 5 BRDF as a function of azimuth

(a), (c): $\lambda=450 \text{ nm}$; (b), (d): $\lambda=850 \text{ nm}$; (a), (b): $\theta_r=20^\circ$; (c), (d): $\theta_r=60^\circ$

为了应对遥感数据的波长限制,还需要了解 BRDF 的光谱分布。如图 6 所示为主平面内不同太阳天顶角和观测天顶角的 BRDF 谱线,图 6(c)和(f)两图采用右侧纵坐标轴。可以看到,除 II 号冰受泥沙影响以外, $\theta_r = -60^\circ$ 和 0° 的(a), (d)和(b), (e)中的谱线形状和反照率谱线比较相似,光谱峰值的位置以及随太阳天顶角的变化规律都很接近,区别在于 BRDF 在长波段的反射率下降速度和幅度都更大。此外,在(c), (f)中可以看到, $\theta_r = 60^\circ$ 点附近的反射率在短波段较低(依然远大于体散射)且随波长增加而迅速升高,增长到极大值后在长波段一直维持着一个很高的值。结合前面分析可以认为冰内体散射主要发生在反射峰值前的短波段,而冰的表面反射主要发生在反射峰值后的长波段。对比(a), (d)和(c), (f)可以发现,表面反射的 BRDF 光谱受太阳天顶角的影响较大,而体散射受影响不明显。(a), (b)及(d), (e)的对比可以发现 III, IV 和 V 号在 $\theta_r = -60^\circ$ 和 0° 的反射率相差很小,是因为三个测点冰内含有大量气泡,体散射很强。

根据图 4—图 6 的分析,已经初步得到 BRDF 的角度和光谱分布的规律,还需要了解反射率和反照率之比即 ARF 的规律。如图 7(a—f)所示为主平面内不同太阳天顶角和观测天顶角的 ARF 谱线。可以看到 ARF 随观测天顶角变化比

BRDF 更明显,在 $\theta_r = -60^\circ$ 时 I, III, IV 和 V 号冰的值相近,且变化规律相似,在 $300 \sim 400 \text{ nm}$ 波长范围内有不同程度的小幅度增加,然后随着波长的增大而减小,750 nm 后减小的速度较大,与 II 号冰减小的趋势有明显区别,总体来说来自冰内体散射的反射光对反照率的贡献随着波长的增大而减小。而在 $\theta_r = 0^\circ$ 时,各测点之间反射率大小差异明显,但 II 号冰的变化呈现出先增后减的趋势,与其他点一致。在 $\theta_r = 60^\circ$ 时,ARF 值整体上随波长增大而增大,说明来自表面反射的光对反照率的贡献随波长增大而增大。

对比不同太阳天顶角的谱线可见,在 $\theta_r = -60^\circ$ 时,各点受太阳天顶角变化影响很小。而 $\theta_r = 60^\circ$ 时,随着太阳天顶角增大,III 号冰没有明显的变化,II 和 V 号冰出现明显的整体增大,I 和 IV 号冰整体减小。结合图 6 可以发现,BRDF 大小顺序和 ARF 的并不一致,说明不同状态的冰在特定方向的反射率对反照率的贡献并不相同,且在前向散射方向更明显,依靠反射率反演反照率还需要考虑波段、太阳天顶角、冰物理性质及表面情况。

2.3 与前人研究的对比

由于 BRDF 现场测量的复杂性,前人研究中报道的实测结果较少,图 8(a,b)综合了已有数据与本研究观测数据的对

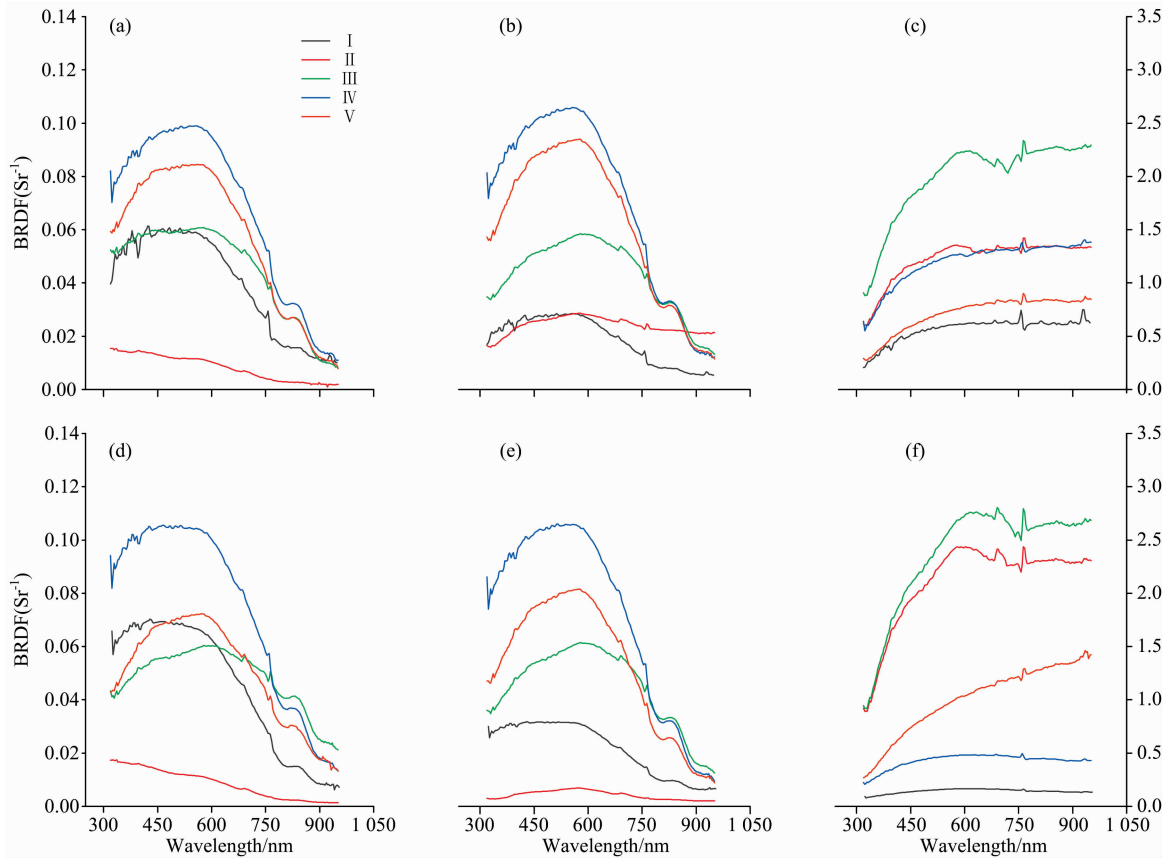


图 6 BRDF 光谱

(a), (b), (c): $\theta_i = 56.5^\circ \sim 58.6^\circ$; (d), (e), (f): $\theta_i = 62.1^\circ \sim 65.2^\circ$; (a), (d): $\theta_r = -60^\circ$; (b), (e): $\theta_r = 0^\circ$; (c), (f): $\theta_r = 60^\circ$

Fig. 6 Spectral value of BRDF

(a), (b), (c): $\theta_i = 56.5^\circ \sim 58.6^\circ$; (d), (e), (f): $\theta_i = 62.1^\circ \sim 65.2^\circ$; (a), (d): $\theta_r = -60^\circ$; (b), (e): $\theta_r = 0^\circ$; (c), (f): $\theta_r = 60^\circ$

比。其中, Perovich^[10]在无云天气对加拿大雷索卢特湾的融冰期的 1.58 m 厚海冰进行了现场 BRDF 测量。Arnold^[6]在波弗特海的融冰期对海冰进行航空测量, 测量高度为 600 m, 测量时几乎无云。有研究在渤海辽东湾对冬季海冰进行现场测量, 测量时天气阴, 灰冰和白冰的厚度分别为 0.22 和 0.24 m。可以看到, 对比数据都是来自于海冰, 相比于湖冰, 海冰形成过程中水动力条件更加复杂, 而且含有卤水泡和结晶盐颗粒, 导致湖冰和海冰两者的组分存在差异, 这些差异共同影响了冰的光学性质, 得到图 8 中曲线的整体趋势相似, 细节上存在差别的结果。但前人的研究中只记录了基本的冰厚数据, 无法对组分差异进行量化, 因此在对比分析中更多的强调趋势而非具体值。

图 8(a)中可以看到光谱主反射峰的位置差异, 本文的数据中主反射峰都出现在 550~600 nm 之间, 而有研究结果主峰值在 600~650 nm 之间, 从图中无法判断 Perovich^[10]结果的峰值位置, 但不会大于 400 nm。这是由于冰内泥沙等杂质含量差异造成的, 随着冰内杂质的增多峰值会向长波方向移动。第二个差异是反射率的相对大小, 该结果的峰值与本研究 IV 和 V 号冰很接近, 但在短波段却明显低于本研究, 长波段反之, 这是因为冰内杂质在短波段的吸收系数大于纯冰, 而在长波段小于纯冰。而 Perovich^[10]的反射率结果整体高于

本研究, 由于其反照率也都高于本研究结果, 因此无法判断谱线差异的具体原因。

图 8(b)中可以看到在体散射部分以往研究结果与本研究 IV 号冰很接近, 趋势也十分吻合, 主要的差异为 $\theta_r = 60^\circ$ 的表面反射。与 Perovich^[10]结果的差异来自 BRDF 对方位角敏感性, 本结果中除 $\varphi_r = 180^\circ$ 出现强反射以外, 其他方位角之间差距非常小, 而 Perovich 的反射率从峰值点开始一直减小, 到后向散射方向达到最小值(参考文献[10]图 3), 即在其他方位角上散射的能量较高, 减小了前向散射的反射率, 这是由冰物理性质的不同导致的体散射差异。与 Arnold^[6]结果的差异可能也是同样的原因, 因为两者都属于北极海冰, 在物理性质上更加相似。另一个可能的原因是航空测量过程中即使没有云层遮挡, 空气中的水蒸气和细颗粒物也会对反射光产生散射, 导致冰表面反射光被削弱。

3 结论

通过对冬季乌梁素海的几种典型湖冰表面进行现场光学性质调查来研究冰的双向反射特性。冰的散射光由两部分叠加而成, 来自冰内的体散射和冰表面反射。结果表明, 在对方向的敏感性上, 体散射在短波段会受到冰内性状均匀性的

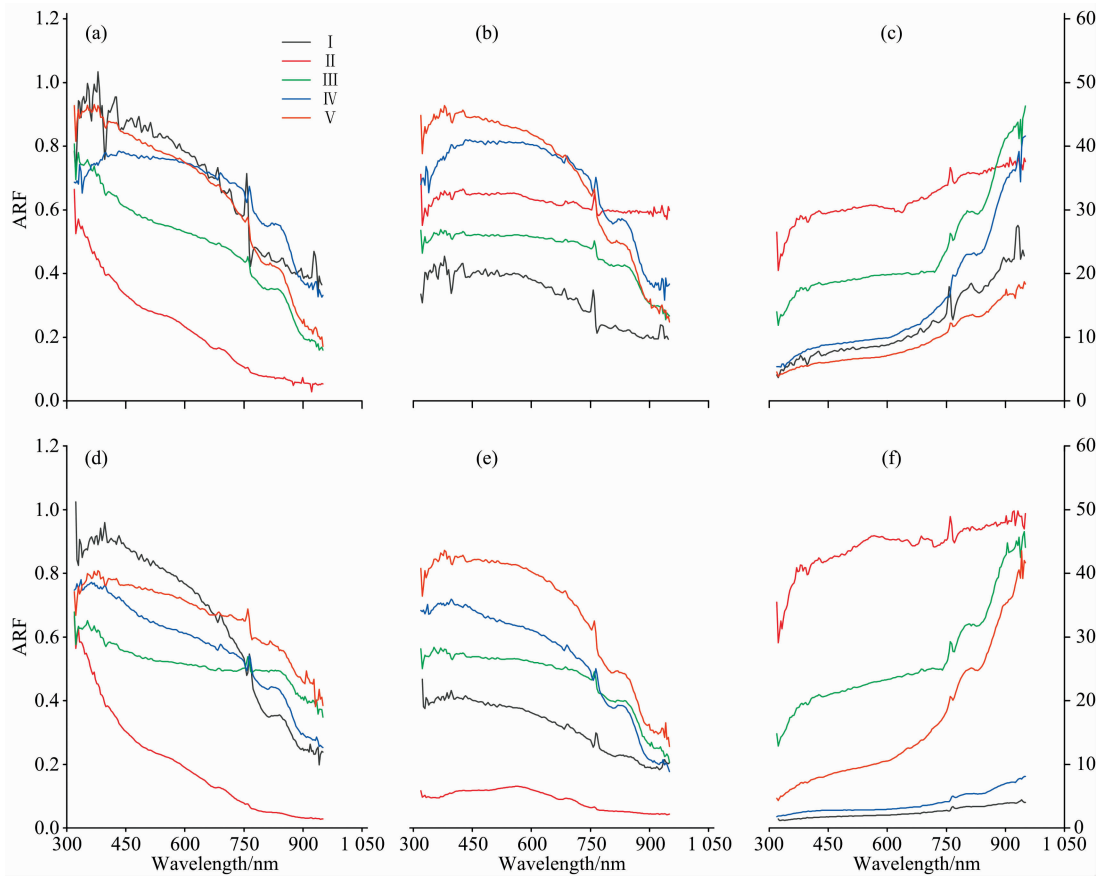


图 7 ARF 光谱

(a), (b), (c): $\theta_r = 56.5^\circ \sim 58.6^\circ$; (d), (e), (f): $\theta_r = 62.1^\circ \sim 65.2^\circ$; (a), (d): $\theta_r = -60^\circ$; (b), (e): $\theta_r = 0^\circ$; (c), (f): $\theta_r = 60^\circ$

Fig. 7 Spectral value of ARF

(a), (b), (c): $\theta_r = 56.5^\circ \sim 58.6^\circ$; (d), (e), (f): $\theta_r = 62.1^\circ \sim 65.2^\circ$; (a), (d): $\theta_r = -60^\circ$; (b), (e): $\theta_r = 0^\circ$; (c), (f): $\theta_r = 60^\circ$

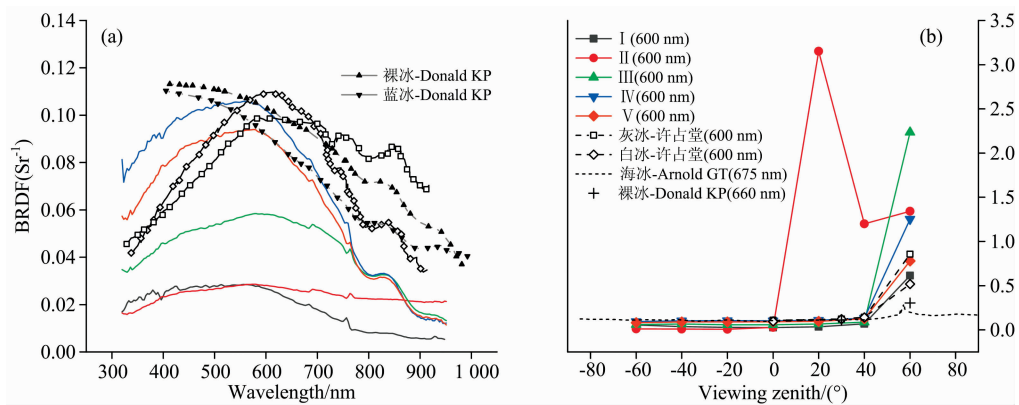


图 8 本研究与以往研究结果对比

(a): $\theta_r = 0^\circ$, 本研究数据 $\theta_r = 56.5^\circ \sim 58.6^\circ$, 许占堂数据 $\theta_r = 63^\circ$, Perovich 数据裸冰 $\theta_r = 60^\circ$ 、蓝冰 $\theta_r = 58^\circ$;

(b): Arnold 观测数据 $\theta_r = 56^\circ$, 其他信息与图 8(a)一致

Fig. 8 Comparison between previous studies and results in this paper

(a): BRDF at nadir, where $\theta_r = 56.5^\circ \sim 58.6^\circ$ in the data of this paper, $\theta_r = 63^\circ$ in Xu's data, $\theta_r = 60^\circ$ and 58° in Perovich's bare ice and blue ice data respectively; (b): $\theta_r = 56^\circ$ in Arnold's data and the other information is identical with Fig. 8(a)

少量影响, 在长波段对天顶角和方位角都不敏感。而表面反射会在前向散射方向形成一个反射的峰值点, 峰值的天顶角

位置受冰表面情况影响。反射光的光谱组成上, 体散射主要由短波段的光组成, 对反照率的贡献随波长的增大而减小,

而表面反射主要由长波段的光组成,对反照率的贡献随波长增加而增加。根据以上结论,在反演反照率的时候可以避免遥感数据的角度和波段的限制,将反射率扩展到半球面上其他角度和波段上。从几种典型冰的结果来看,反射率对角度的依赖性规律比较稳定,但对波长的依赖性受冰的气泡和泥沙含量等性质的影响很大,对波长的扩展需要根据冰的具体性质来进行。最后将半球积分的反射率除以对应的 ARF 数据即可得到反照率。

此外,传感器在波段较小和较大的部分有较大的系统误差^[15]。本工作的测量中最大的观测天顶角为 60° ,没有获取

到完整天顶角的反射率数据。而且在后向散射方向 $\theta_r \approx \theta_i$ 角度处的测量过程中,传感器会对入射光产生一定的遮挡,但从测量结果上并未发现某角度下的散射强度明显小于附近角度,影响效果不明显,以上两个问题都可以通过设备优化解决。在定性研究的基础上,下一步的工作将根据湖冰上的试验经验,在渤海海冰和北极海冰上相继开展研究,并将冰的双向反射特征和气泡密度、杂质含量、表面形态等冰物理性质之间建立更直接的联系,得到更多定量的结果来为冰区遥感提供更加有效的支持。

References

- [1] Brown L C, Duguay C R. *Progress in Physical Geography*, 2010, 34(5): 671.
- [2] Lei R, Tian-Kunze X, Leppäranta M, et al. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(8): 5470.
- [3] Liang S L, Zhao X, Liu S H, et al. *International Journal of Digital Earth*, 2013, 6(Sup1): 5.
- [4] Barnes B B, Hu C. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 175: 120.
- [5] Svacina N A, Duguay C R, King J M L. *Hydrological Processes*, 2014, 28(16): 4562.
- [6] Arnold G T, Tsay S C, King M D, et al. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(18): 3763.
- [7] Gatebe C K, King M D. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 179: 131.
- [8] Jin Z H, Simpson J J. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(1): 543.
- [9] Malinka A, Zege E, Heygster G, et al. *The Cryosphere*, 2016, 10: 2541.
- [10] Perovich D K. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C2): 3351.
- [11] Gardner A S, Sharp M J. *Journal of Geophysical Research. Earth Surface*, 2010, 115: F01009.
- [12] Grenfell T C, Light B. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(C10): 8032.
- [13] Marks A A, King M D. *The Cryosphere*, 2014, 8: 1625.
- [14] Light B, Grenfell T C, Perovich D K. *Journal of Geophysical Research. Oceans*, 2008, 113: C03023.
- [15] Lei R, Zhang Z, Malero I, et al. *Polar Research*, 2012, 31: 17325.

Field Observations of the Bidirectional Reflectance Characteristics of Lake Ice

YU Miao¹, LU Peng^{1*}, CAO Xiao-wei¹, TANG Ming-guang¹, WANG Qing-kai¹, LI Zhi-jun^{1, 2}

1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China
2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Lanzhou 730000, China

Abstract Ice surface albedo is an essential parameter associating with the energy exchange between water and atmosphere in cold regions, which can be retrieved from satellite remote sensing data. However, reflectivity data is not equal to the ice surface albedo because satellites always have a limited field of view at specific wavelength bands and observational angles. Anisotropy corrections are also needed according to the conditions of underlying surfaces. Since ice has strong forward scattering and its optical properties are sensitive to its physics, there is large difference in reflectance among different ice types and at different observational angles, which results in uncertainties in ice albedo retrievals. The field observations on lake ice were conducted in Wulian-suhai lake, Inner Mongolian February 2019. Spectral measurements of surface albedo, bidirectional reflectance distribution function(BRDF) and anisotropy reflectance factor(ARF) were conducted for the five types of lake ice: (I) ice with non-uniform bubbles under overcast sky; (II) ice with sands on surface; (III) ice with big bubbles inside; (IV) ice with dense small bubbles inside, and (V) melting ice. The differences among them are discussed. The results reveal that lake ice albedo increases with the solar zenith, except for the melting ice case, showing an opposite trend. The bidirectional reflectance characteristics of ice present an obvious anisotropy. Peak reflectivity takes place in the direction of the forward scattering, and the location is significantly affected by the ice surface condition. The reflected light in the other directions mainly come from volume scattering in ice,

which is insensitive to the observed zenith and can be affected by ice's uniformity at shortwave band rather than at longwave band. Results on BRDF indicate that the spectral shape of volume scattering is similar to albedo, but the attenuation rate in the longwave band of BRDF is faster than that of albedo. That is, the energy of volume scatter is more concentrated in the shortwave band. However, in the direction near the reflectivity peak, the energy is more concentrated in the longwave band than in the shortwave band. ARF results reveal that the contribution of volume scattering to surface albedo decrease with wavelength, but the role of surface reflection is on the contrary. More importantly, the order of the ARF was not the same as that of the BRDF, which suggests that the retrieval parameters for the surface albedo of different ice types are not identical even under the same observational angle.

Keywords Lake ice; Field observation; Bidirectional reflectance distribution function; Anisotropy reflectance factor

* Corresponding author

(Received Jul. 8, 2019; accepted Nov. 16, 2019)

(上接 2452 页)

2.4 墙报展示

墙报展示作为本次会议的一种主要形式。墙报要求制作规范,内容体现研究工作的创新点。在准备墙报时注意以下几个方面:

1. 墙报尺寸:高 110 公分×宽 80 公分;
2. 墙报内容不包括中英文摘要和参考文献;
3. 墙报内容以图文为主,层次分明,主要体现研究工作的创新性,主要结果和结论;
4. 墙报右上侧写上论文编号;

拟作墙报展示的代表,在会议注册系统中提交墙报题目和编号。组委会将组织专家对青年学者、博硕士研究生墙报进行评审,并对优秀墙报颁发优秀论文证书和奖金。

三、会议稿件

会议截稿日期为 2020 年 6 月 30 日,请大家按照会议第一轮通知的要求继续投稿。

<http://www.sinospectroscopy.org.cn/readnews.php?nid=94098>

四、会议注册

4.1 会议注册费

2020 年 9 月 20 日以前缴纳注册费:正式代表:1600 元/人;学生代表:1000 元/人;2020 年 9 月 20 日后及现场缴纳注册费:正式代表:1800 元/人;学生代表:1200 元/人,现场缴费将邮寄发票。由于酒店房间是预留,2020 年 9 月 20 日后及现场缴纳注册费的代表将不能保证房间;陪同家属 1000 元/人(没有发票)。

会议注册费收缴方式:

银行汇款,如网银、手机银行、支付宝、微信转账、银行柜台等。

收款单位:四川大学(请注明:2020 光谱+姓名);

帐 号:5100 1870 4690 5988 8666;

开 户 行:建行成都川大支行;

汇款成功后请务必将姓名、参会编号、单位发票抬头、单位税号、汇款金额通过邮箱(atcpubs@scu.edu.cn)告知会务组,以便核实会议注册费发票信息。(如果需要开具增值税发票,请注明并提供单位名称、纳税人识别号、地址、电话、开户行及账号)

发票联系人:张亮 联系邮箱:zhang.liang@scu.edu.cn 联系方式:15902844473

4.2 会议注册系统

请登陆光谱网会议主页:<http://www.sinospectroscopy.org.cn/meeting/index.php?mid=24>

注册并提交您的参会信息,包括个人信息、报告题目、墙报题目、住房预定等信息。

4.3 会议住宿

会议酒店:

1. 世外桃源酒店

地址:四川省成都市武侯区科华北路 69 号

酒店房间价格:标间 620 元/间天;大床房 560 元/间天

(下转 2473 页)

50% at 400 °C, which was mainly attributed to the loss of light components and the dehydrogenation of naphthenic structures. The green coke formed at 500 °C had Only 0.15 Wt. % aliphatic hydrogen and 0.88 Wt. % SP³C, and the presence of aliphatic hydrogen was not detected at 600 °C. However, the aromatic hydrogen increased slightly from 3.89 Wt. % of the raw material to 4.5 Wt. % before 400 °C because of the conversion of the naphthenic structures into aromatic rings. As the temperature increases further, aromatic hydrogen decreases rapidly, reaching only 1.14 Wt. % when the temperature reaches 500 °C, indicating that the aromatic hydrocarbon molecules undergo intense dehydrogenation condensation reaction during the mesophase formation stage at 400 ~ 500 °C, which was also confirmed by the conversion of a large number of protonated SP²C into unprotonated SP²C. Aromatic hydrogen continued to decrease after 500 °C, and their presence was not detected at 800 °C. In addition, it was found that the out-of-plane bending vibration of aromatic C—H is more sensitive to infrared light than its in-plane stretching vibration. The increase of I_{ar} and the decrease of these parameters such as H/C atomic ratio, I_{os} , CH₃/CH₂ indicated that the aromatic molecules in the SCTP are gradually grown up by their condensation, and its aromaticity increased in the coking process. The fast quantification of various types of hydrogen by infrared spectrum can timely understand the structural changes of aromatic hydrocarbon molecules of the pitch in the coking process, which is helpful to the production of needle coke.

Keywords Coal-based needle coke; Coal-tar pitch; Infrared spectroscopy; Quantitative analysis

* Corresponding author

(Received Jul. 17, 2019; accepted Nov. 26, 2019)

(上接 2461 页)

2. 科华苑宾馆

地址: 四川省成都市武侯区科华北路 141 号

酒店房间价格: 标间 360 元/间天; 大床房 470 元/间天

由于会议期间住宿相对紧张, 涉及到房间预定、会议安排等因素, 务请各位专家、同学在截止日期前注册, 只有在收到注册费后, 才会进行会议相关安排, 务请体谅与协助。

五、会议组织机构

大会组委会人员组成请见如下链接: http://www.sinospectroscopy.org.cn/meeting/extend.php?mid=24&body_id=12

学术委员会人员组成见如下链接: http://www.sinospectroscopy.org.cn/meeting/extend.php?mid=24&body_id=13

有关会议的邀请报告、住房信息、交通路线、稿件编号等信息敬请登录会议主页查询。

六、组委会和会务组联系方式

组委会:

吴兰: 13688385033 Email: wulan@scu.edu.cn

会务组:

注册 & 住宿: 张 亮 15902844473 Email: zhang.liang@scu.edu.cn

报告 & 论文: 李成辉 18980877825 Email: atcpubs@scu.edu.cn

厂商联络: 王香凤 13520034335 Email: xiangfeng@bnu.edu.cn

七、支持媒体

会议官网: 光谱网 (<http://www.sinospectroscopy.org.cn>)

会议各类信息发布以光谱网信息为准。

主办单位:

中国光学学会

中国化学会

中国光学学会光谱专业委员会

承办单位:

四川大学分析测试中心

中国光学学会光谱专业委员会

四川大学分析测试中心

2019 年 11 月 18 日