

乌梁素海湖冰晴天反照率日变化特征的统计模型比较和分析*

汤明光¹, 李志军¹, 卢鹏^{1**}, 曹晓卫¹, 李国玉^{2**}, Leppäranta Matti³, Arvola Lauri⁴, 石利娟⁵

(1: 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 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, 兰州 730000)

(3: 赫尔辛基大学大气与地球科学研究所, 赫尔辛基 00014)

(4: 赫尔辛基大学拉米生物实验站, 拉米 16900)

(5: 中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室, 北京 100094)

摘要: 乌梁素海湖冰晴天反照率日变化具有双峰特征, 利用当地太阳高度角同经纬度和儒历的关系, 归一化到北京时, 依此表达湖冰反照率日变化规律. 基于具有指数函数形式的拉普拉斯、高斯、耿贝尔和柯西 4 种概率密度分布函数建立线性组合模型, 对日出后到日落前太阳高度角大于 5° 时段内的反照率日变化数据进行拟合, 发现拉普拉斯密度分布函数组合是最佳统计模型. 它既能拟合太阳高度角大于 5° 时间范围内反照率日变化曲线的双峰特征, 又能反映太阳高度角大于 15° 时间范围内反照率日变化曲线双峰之间的 U 型分布. 该模型不仅形式简单, 而且意义明确: 尺度参数约为日长的一半, 双峰位置与日出时刻关系密切; 同时能体现 2 个反照率峰值的不对称性. 为发展不同地区湖冰反照率日变化参数化方案奠定基础.

关键词: 湖冰; 太阳辐射; 反照率; 日变化; 统计模型; 乌梁素海; 概率密度分布函数

Comparison and analysis on the statistical models for the diurnal variations of lake ice albedo under clear skies of Lake Ulansuhai*

TANG Mingguang¹, LI Zhijun¹, LU Peng^{1**}, CAO Xiaowei¹, LI Guoyu^{2**}, LEPPÄRANTA Matti³, ARVOLA Lauri⁴ & SHI Lijuan⁵

(1: *State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, P.R.China*)

(2: *State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, P.R.China*)

(3: *Institute of Atmospheric and Earth Sciences, University of Helsinki, Helsinki 00014, Finland*)

(4: *Lammi Biological Station, University of Helsinki, Lammi 16900, Finland*)

(5: *Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, P.R.China*)

Abstract: Based on the features of diurnal variation of ice surface albedo in the Lake Ulansuhai, the relationship between solar elevation angle and geographic coordinates and Julian days, together with normalized time, to express the diurnal variations of the ice albedo. Linear combinations of four probability density distribution functions with exponential forms, including Laplace, Gauss, Gumbel, and Cauchy equations, were used to simulate the diurnal variations in observed ice albedo from sunrise to sunset with solar elevation angle more than 5°. The results reveals that the Laplace combined statistical model is the best fit to the observations. It can not only clearly show the double-peak distribution in the diurnal variation in ice surface albedo when the elevation angle is greater than 5°, but also express the U-type distribution between the two peaks as the elevation angle is more than 15°. This model has

* 2019-12-19 收稿; 2020-02-13 收修改稿.

国家自然科学基金项目(51979024, 41676187)、国家重点研发计划专项(2018YFA0605901)和冻土工程国家重点实验室年开放基金项目(SKLFSE201604)联合资助.

** 通信作者; E-mail: lupeng@dlut.edu.cn, guoyuli@lzb.ac.cn.

advantages of simple form in expression and clear physical meaning. The length parameter is close to half day, and the peak location is associated with the time of sunrise, and the asymmetry of the two peaks can be also shown. It provides a solid foundation for the parameterization schemes on the diurnal variations in lake ice surface albedo in different regions.

Keywords: Lake ice; solar radiation; albedo; diurnal variation; statistical model; Lake Ulansuhai; probability density distribution function

反照率是物质表面的固有光学特性. 地表由多种物质组成, 而物质表面反照率随其成分及结构、光线入射角和周边环境变化存在时空差异, 所以地表反照率实际上是随经纬度、儒历日和云量变化的动态参数. 反照率的细微变化会影响到地气系统的能量收支平衡. 在全球气候变化日益突出的背景下, 反照率成为地球科学研究领域的热点问题. 其中, 冰面反照率不仅应用到各种光学遥感遥测技术、航空拍摄和高光谱成像监测、以及气候变化中的大气-陆面能量平衡研究, 而且对于海冰、湖冰、河冰而言, 它还能够成为冰下水生化环境和生态响应的驱动因子. 一般而言, 冻结的冰面能够引起反照率增大、蒸发降低和进入水体的太阳辐射降低. 这些过程会造成大气和湖泊之间动量和能量交换减弱, 湖泊水体内部的湍流混合过程减弱, 进一步引发冰下水体温度、溶解氧、叶绿素等生化环境条件的变化^[1-2].

中国冰下水环境研究相对集中在内蒙古乌梁素海, 开展的系列工作包括水质现场调查^[3-4]、实验室测试^[5]、冰-水-泥物质交换^[6]. 这些成果尚未明确解释冬季湖泊结冰后水生化环境要素变化的驱动力. 而国际研究成果则表明太阳辐射是冰下水生化环境要素变化的关键因子. 首先太阳辐射能量驱动冰下水体对流^[1], 使其具有显著的日变化^[7]和季节变化^[8]. 之后水动力同生化过程联合作用引起溶解氧^[2]、浮游生物^[9-10]的规律性交换运动. 但已有成果只是具体到某一冰下水物理和生化因素变化之间的关系, 缺乏同太阳辐射、气象要素(云量、气温、风)和冰物理要素(冰厚、晶体结构、冰内气泡)之间的联系. 其必要性是因为: 首先冰的消融是气象要素控制的能量和质量平衡的结果; 其次冰晶体和冰内气泡等物理要素决定着冰的消光系数. 而消光系数一定时, 传递到冰下的辐射能量又随着冰厚的增加而减少. 因此, 理解冰下水生化环境变化的太阳辐射驱动力, 需要将冰面气象要素、冰光学参数和冰物理参数联合起来形成一个耦合体系.

冰面反照率是气-冰-水-生态耦合系统的关键输入变量之一. 但计算冰面反照率日变化没有统一的表达式, 也没有规定的观测数据拟合方法. 不同学者根据自己的研究目标决定数据处理方式, 具体到湖冰反照率日变化的参数化更是罕见. 光学卫星遥感则需要能够反映过境时刻的下垫面反照率. 在陆面能量平衡和植物生长计算中, 太阳高度角小于 15° 时的辐射通量约为每日太阳辐射总量的10%, 而太阳高度角小于 5° 时的辐射通量则仅为日总量的1%. 因此当太阳高度角小于一定值时, 其辐射能量就可以忽略. 在选择反照率日变化观测数据分析的始终点时, 有以太阳高度角做判据的, 选择的起始太阳高度角为 5° ^[11]、 15° ^[12]、 30° ^[13], 甚至 40° ^[14]; 有以辐射通量做判据的, 分别是 5 W/m^2 ^[15]、 30 W/m^2 ^[16]、 50 W/m^2 ^[17]、 100 W/m^2 ^[14]; 或者规定冬季和春季分别采用8:00-18:00^[17]或者6:00-19:00^[14]时间段的辐射观测数据.

利用 Trios 高光谱辐射传感器能获得太阳高度角从黄昏到晚霞时段的每分钟可靠辐射记录数据, 计算出稳定的湖冰反照率^[15]. 从物理角度看, 太阳高度角从日出的 0° 到日落的 0° 之间的反照率曲线具有双峰特征. 以往反照率观测技术灵敏度低^[16,18]、记录频次少, 观测数据难以获得这种曲线. 即使考虑早晚地面太阳总辐射较小, 并存在散射^[16-17]等影响, 当反照率日变化的时间范围覆盖太阳高度角大于 5° 的时段, 曲线仍然呈双峰. 但如果覆盖的时间范围是太阳高度角大于 15° 对应的时段, 则曲线处于两个峰值之间, 呈U型^[16]. 对于U型变化, 文献认为反照率和太阳高度角之间呈指数函数关系^[12,14], 但只能将U型分为前后2段, 分别计算. 由于指数函数不存在峰值, 如果统计式不指明适用范围, 当计算到接近日出和日落时刻, 计算值就高于实际值. 为了体现峰值, 有学者采用3次幂函数拟合, 而其后半段在计算中排除^[19]. 事实上, 有不少密度分布函数在形式上保持指数函数形式, 并且具有两侧对称或不对称的峰值, 只是计算相对指数函数繁琐. 如果利用这些密度分布函数, 既保留反照率随太阳高度角呈指数函数形式变化的普遍作法, 又能描述出峰值, 建立普适性表达式. 因此本文首先利用在乌梁素海观测数据给出湖冰反照率日变化特征, 其次对比与前人观测结果的差异和原因, 最后寻找采用概率密度分布函数建立湖冰反照率日变化的普适性数学表达式, 实现利用一个表达式既能计算太阳高度角大于 5° 时间范围的双峰反照率日变化曲线, 也能计算太阳高度角大于 15° 时间范围的双峰之间U型反照率日变化曲线.

1 观测地点和方法

1.1 观测地点

依托内蒙古乌梁素海湿地生态系统国家定位观测研究站,开展了4个冬季的气-冰-水-泥物理与水生态综合调查研究.乌梁素海属于中国西北半干旱地区的多功能型湖泊,是中国八大淡水湖泊之一,面积约300 km²,地处北纬41°N、东经108°E,海拔高度1020 m.湖泊周边为农田、沙漠和盐碱地,岸边生长着茂密的芦苇.该湖泊每年冬季都会结冰,冰厚60~70 cm.冰面基本平整,只存在个别隆起冰脊.有些冬季冰面存在积雪,在大风天气会将周边农田沙尘带到冰面或雪面.该湖冬季晴天日数多于阴天和多云天气总数,每日有8小时以上的日照,但最大太阳高度角仅接近35°.本文基于2019年1月16日至2月11日在湖的中东部开展的湖冰反照率调查研究,观测点为离岸边芦苇约1 km的开阔冰面,其表面只有5 mm厚度的零星积雪斑块,冰内存在明显的气泡,测试期间没有降雪.乌梁素海的详细自然环境条件参考文献[3-4].

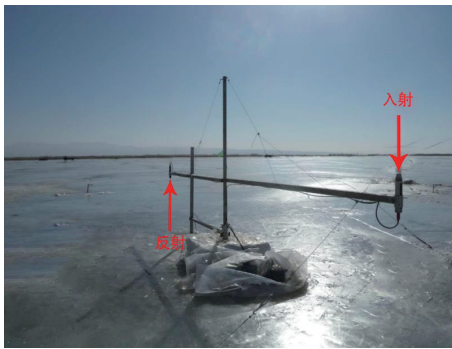


图1 乌梁素海冰面辐射观测的照片

Fig.1 Photos of radiation observation over the Lake Ulansuhai ice surface

表1 Trios 光谱传感器技术参数

Tab.1 Technical parameters of Trios solar radiation sensor

技术指标	RAMSES-ACC-VIS
波长范围	320~950 nm
像素色散	3.3 nm/像素
波长精度	0.3 nm
可用频道	190
精度	>6%~10%
温度范围	-10~50℃

1.2 观测方法

观测时将两个 Trios 高光谱辐射传感器固定在距冰面1 m 高度,分别竖直朝上和朝下(图1),其中朝下的传感器在冰面投影点20 m 半径范围内为裸冰,其他部位的积雪斑块对反射光谱无影响.每分钟记录1次入射和反射光谱.此外,有4个辐射传感器安装在冰下不同深度.现场观测工作持续25天.

该辐射传感器的有效测量波长范围为320~950 nm,分为190个波段,对应的采样间隔约为3.3 nm(± 0.3 nm)^[15].具体传感器技术参数汇总见表1.该传感器的精度能够满足包含散射辐射通量时的反照率计算精度要求.

2 湖冰反照率的日变化特征

将辐射传感器测量的入射辐射和反射辐射进行积分,得到光谱的积分通量.之后利用反射辐射通量与入射辐射通量之比获得冰面反照率.观测期间晴天有15天,少云、多云和阴天共计10天.分析每天反照率的日变化曲线,发现湖冰反照率从日出到日落的变化同云量有很大关系.图2绘制了5种不同天气的反照率日变化典型曲线.其中,2019年1月22日为晴天的变化曲线.该日各时刻太阳的入射和反射强度、反照率不属于最强,曲线上噪音信号较小,上午和下午各有一个峰值.第一峰值出现时刻大约为日出后1.5 h,对应太阳高度角为13.12°~14.39°;第二峰值大约出现在日落之前0.8 h,对应太阳高度角为4.81°~8.87°.两个峰值的反照率不等,表现出明显的不对称^[20].

晴天反照率谷值出现时刻约为日长的一半,对应太阳高度角范围在28.69°~32.48°之间.但是因北京与地方午时的差异,反照率谷值出现在一个时间区域,也导致双峰左右两侧的时间范围不对称.为了同反照率日变化的U型曲线对比,这种双峰曲线本文简称为偏M型.

2019年1月18日为多云天气,该日的反照率对比晴天有一定的减弱,反照率曲线仍然呈偏M型,但是噪音增强,表现出云量和位置变化带来的影响.另外,第一峰值相对晴天延迟出现0.5 h,而第二峰值提前出现2.0 h(见图2中的红线).如果上午为阴天时,第一峰值不明显(图2中2019年1月28日);而下午为多云时,第二峰值偏低(图2中2019年1月17日).阴天的冰面反照率日变化曲线仍然保持双峰特征,两个峰值基本对称.第一峰值出现比晴天约晚0.5 h,第二峰值比晴天提前1.5 h.但反照率峰值明显小于晴天.全天接

近常数(图2中2019年1月30日),但比黄昏时的稍高,属于相同量级.

5种不同天气的反照率日变化主要来自云量的影响,而云量对太阳辐射的影响可见图3^[21].当太阳高度角相同时,云量越高,到达冰面的太阳辐射强度越低,两者具有明显的非线性关系.当云量占比大于80%时,它对到达冰面的太阳辐射通量影响最显著.可见,一般用于天气描述的“晴天、少云、多云、阴天”等概念显然不适用于开展图2所示的反照率定量分析.因此,目前的研究只能对云量为0的晴天和云量100%的阴天开展定量分析.而阴天对应的反照率基本为一常数.另外,前人采用总辐射量 30 W/m^2 ^[16]、 50 W/m^2 ^[17]和 100 W/m^2 ^[14]作为分析反照率日变化的阈值,也只能针对晴天,对阴天并不合适.

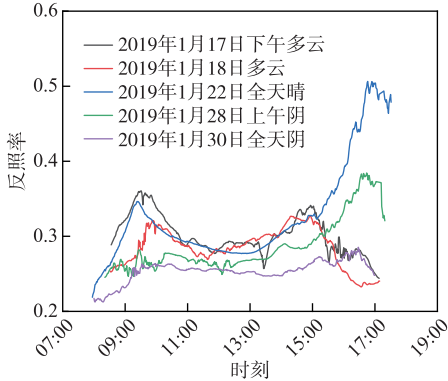


图2 不同天气情况的冰面反照率日变化
Fig.2 Diurnal variation of ice albedo under different sky conditions

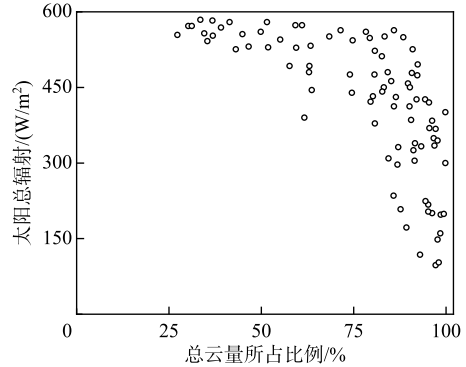


图3 日平均总云量与太阳总辐射相关性^[20]
Fig.3 Correlation between diurnal averaged total cloud fraction and total solar radiation^[20]

2019年1月22日的晴天观测数据可以与文献资料进行对比.由于文献中一般只给出地方中午前后的测量结果,对该日从日出至日落和北京时11:00—14:00间的观测数据,分别计算反照率算术平均值和入射强度加权平均值.采用日出至日落反照率计算的算数平均值和入射强度加权平均值,分别为0.3242和0.3197,采用11:00—14:00的2种均值,分别为0.2849和0.2847.这说明峰值参与平均计算的结果偏大.11:00—14:00之间Bolsenga^[11]测试了300~3000 nm波段的反照率后指出纯净湖冰的反照率为0.10,含气泡湖冰的反照率为0.22.章睿等^[22]报道北极海冰中的反照率:白冰为0.54,蓝冰为0.31,灰冰为0.21.乌梁素海湖冰内的气泡明显,反照率会偏高,但是目前没有关于气泡含量及尺寸对反照率效应的研究.全天阴时的冰面反照率比晴天小,4种平均方法均接近0.25.2种全天多云和下午多云的地方午时前后平均反照率与晴天接近.下午多云地方午时前后的平均反照率与全天阴的接近.5种典型天气的反照率平均值见表2.

表2 不同天气不同时间范围的反照率算数平均值和入射强度加权平均值
Tab.2 The average and weighted average albedo in different periods in different days

统计时间范围	统计内容	1月17日 下午多云	1月18日 多云	1月22日 全天晴	1月28日 上午阴	1月30日 全天阴
日出至日落	算数平均值	0.3018	0.2856	0.3242	0.2848	0.2539
日出至日落	入射强度加权平均值	0.3027	0.2943	0.3197	0.2832	0.2563
11:00—14:00	算数平均值	0.2889	0.2880	0.2849	0.2674	0.2526
11:00—14:00	入射强度加权平均值	0.2894	0.2892	0.2847	0.2680	0.2527

3 数学统计模型的构建、拟合和选取

3.1 构建数学统计模型的思想

表面反照率参数化方案需要考虑太阳高度角和表面特征两个独立的影响因素,两者之间对反照率的贡献构成乘法或者加法关系^[23],但参数的基本形式应该符合反照率变化的基本特征.这就表明仅用某一固定的算法并不适宜,可以根据现场研究成果的积累而逐渐完善.乌梁素海晴天湖冰反照率的完整日变化曲线具有双峰特征,忽略夜间数据,将反照率日变化视作周期变化,统计模型时间单位采用日.应用线性叠加原则,用2个密度分布函数错峰叠加,就可以形成具有双峰的函数形式,而且2个峰值独立存在,能表达出其不对称性^[20].新统计模式为了兼顾不同研究目标所需的不同统计时间范围,要求模型表达式即能计算具有双峰特征呈偏M型的日变化曲线,也能计算太阳高度角大于一定阈值后,双峰之间呈U型的日变化曲线.避免将U型曲线分为二段指数函数来表达,从而保持模型的简洁.

考虑早晚太阳入射辐射较小,并存在散射^[16-17]影响,以太阳高度角 5° 为阈值^[11],将乌梁素海日出时(太阳高度角等于 0°)设为C点,日落时(太阳高度角等于 0°)设为D点,选取晴天观测数据中太阳高度角大于 5° 的数据进行统计.每日D点和C点间的时段作为密度分布函数的基本尺度参数.2个峰值的实际尺度参数设为尺度参数变形系数(g_1 和 g_2)与基本尺度参数之积,即 $g_1(D-C)$ 和 $g_2(D-C)$.拟合峰值出现时刻作为密度分布函数的位置参数(μ_1 和 μ_2).根据上述思想,选择常用的拉普拉斯、高斯、耿贝尔、柯西密度分布函数进行组合.形成4种组合统计模型,分别简称拉普拉斯组合、高斯组合、耿贝尔组合和柯西组合,见公式(1)~(4).之后拟合湖冰观测数据,对比拟合结果来确定最佳统计模型.

拉普拉斯密度分布函数组合:

$$f(t) = \frac{a_1}{2\sigma_1} e^{-\frac{|t-\mu_1|}{\sigma_1}} + \frac{a_2}{2\sigma_2} e^{-\frac{|t-\mu_2|}{\sigma_2}} \quad (1)$$

高斯密度分布函数组合:

$$f(t) = \frac{a_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(t-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{a_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{(t-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} \quad (2)$$

耿贝尔密度分布函数组合:

$$f(t) = y_0 + \frac{a_1}{\sigma} e^{-z_1 e^{-z_1}} + \frac{a_2}{\sigma} e^{-z_2 e^{-z_2}} \quad (3)$$

式中, $z_1 = \frac{t-\mu_1}{\sigma_1}$, $z_2 = \frac{t-\mu_2}{\sigma_2}$.

柯西密度分布函数组合:

$$f(t) = \frac{a_1\sigma_1}{\pi(t-\mu_1)^2 + \sigma_1^2} + \frac{a_2\sigma_2}{\pi(t-\mu_2)^2 + \sigma_2^2} \quad (4)$$

式中, a 为综合拟合系数,下角标1、2分别代表第一峰值和第二峰值; t 为一日中的时刻,单位d; σ_1 、 σ_2 分别为拟合第一峰值和第二峰值对应的实际尺度参数.因此,引入尺度参数变形系数,这时:

$$\sigma_1 = g_1(D-C) \quad (5)$$

$$g_1 = L_1 \cdot C^2 + M_1 \cdot C + N_1 \quad (6)$$

$$\sigma_2 = g_2(D-C) \quad (7)$$

$$g_2 = L_2 \cdot C^2 + M_2 \cdot C + N_2 \quad (8)$$

式中, L 、 M 、 N 分别为式(6)和式(8)的统计系数,下角标1、2分别代表第一峰值和第二峰值; g_1 为第一峰值尺度参数变形系数; g_2 为第二峰值尺度参数变形系数; C 为日出太阳高度角 0° 对应时刻; D 为日落太阳高度角 0° 对应时刻; $D-C$ 为基本尺度参数. C 和 D 根据当地经纬度和儒历日,由理论计算.理论公式的简便计算方法见文献^[24],此处不再赘述.4种组合统计模型的尺度参数变形系数与日出时刻具有抛物线型关系,具体统计系数和相关系数汇总在表3.表3中的相关系数数量级相同,统计系数之间的比例基本相同.耿贝尔组合的第一峰值和第二峰值的尺度参数差异较大,拉普拉斯组合的2个峰值的尺度参数相同,另外2种组合统计

表 3 尺度参数变形系数与日出时刻拟合关系系数
Tab.3 Statistical coefficients for Equation (6) and Equation (8)

密度分布函数	g_1				g_2			
	L_1	M_1	N_1	相关系数	L_2	M_2	N_2	相关系数
拉普拉斯组合	-93.5890	56.9390	-8.0942	0.9988	-93.5890	56.9390	-8.0942	0.9988
高斯组合	-43.2540	26.5550	-3.7686	0.9989	-49.7890	30.6060	-4.3572	0.9985
耿贝尔组合	-6.2447	3.9982	-0.5859	0.8894	-43.1990	26.1510	-3.7614	0.9991
柯西组合	-136.4300	82.6830	-11.8590	0.9994	-137.2500	82.2810	-11.9320	0.9996

模型的尺度参数接近. 从发展参数化方案角度出发,尺度参数相同的拉普拉斯组合可以简化计算步骤.

利用乌梁素海观测点的经纬度计算每天日出和日落时刻,并提取观测期间每一天的反照率日变化曲线的峰值点时刻.发现第一峰值和第二峰值的位置参数也与当地日出时刻有关,即与地理位置和儒历日有关.乌梁素海的位置参数拟合为线性关系:

$$\mu_1 = 0.8973 C + 0.0955 \tag{9}$$

$$\mu_2 = -0.6237 C + 0.9073 \tag{10}$$

式中, μ_1 、 μ_2 分别为第一峰值和第二峰值的位置参数; C 为日出时刻.

3.2 组合统计模型拟合方法和结果

组合统计模型需要确定 6 个统计参数,其中 4 个均与当地经纬度和儒历日有关.因此,拟合需要首先由后向前逐步确定出这 4 个参数,之后再由组合模式计算日变化.具体步骤是:1)利用每日的峰值出现时刻和日出时刻,拟合式(9)和式(10),得到 2 个峰值的位置参数 μ_1 和 μ_2 .2)将 μ_1 和 μ_2 作为已知参数赋入选定的组合统计模型,即式(1)~式(4)的某一个.利用 Origin 软件进行多参数拟合,得到初选尺度参数 σ'_1 和 σ'_2 ,综合系数 a'_1 和 a'_2 .对于拉普拉斯分布函数组合,拟合中发现 σ'_1 和 σ'_2 接近但不相等,为方便计算且符合物理意义,因此取它们的平均值为初选尺度参数,令 $\sigma'_1 = \sigma'_2$.3)利用初选尺度参数 σ'_1 和 σ'_2 分别拟合尺度参数与日出时刻 C 和日长($D-C$)的非线性关系,即使用式(6)、式(5)或式(8)、式(7),得到尺度参数 σ_1 和 σ_2 .4)将 μ_1 、 μ_2 、 σ_1 、 σ_2 再次赋入组合统计模型,利用 Origin 软件进行多参数拟合,得到综合系数 a_1 和 a_2 .

采用 4 种组合统计模型分别拟合 2019 年 1 月 29 日日出至日落前太阳高度角 $\geq 5^\circ$ 的反照率观测值,得到该日的拟合曲线,结果见图 4a.图 4b 直观给出 4 种组合统计模型拟合反照率与现场观测反照率的统计关系,其对应的拟合相关系数、均方根误差和绝对平均误差见表 4.

表 4 2019 年 1 月 29 日太阳高度角 $\geq 5^\circ$ 时间范围的 4 种组合统计模型拟合相关分析

Tab.4 Correlation coefficients and error analysis for the measured albedo over 5° solar elevation angle on 29 January, 2019 by using the four combined statistical models

	拉普拉斯组合	高斯组合	耿贝尔组合	柯西组合
相关系数	0.9896	0.9517	0.9788	0.9708
均方根误差	0.0049	0.0108	0.0070	0.0094
绝对平均误差	0.0038	0.0089	0.0050	0.0079

图 4a 反映出柯西组合对 2 个峰值的拟合偏低,而且在低太阳角时,拟合结果均偏低.在正午前后太阳高度角较高时,拟合结果均偏大.另外拟合曲线的峰值两侧比较缓,导致拟合的第一峰值比实际偏后出现,而拟合的第二峰值比实际提前出现.高斯组合对于峰值部位的拟合比柯西组合稍高,但仍然低估很多.对于早晚的反照率显得偏离大.峰值的位置同样是相对第一峰值的位置偏晚,相对第二峰值位置偏早.曲线的谷值也低估.只是在双峰之间反照率曲线下降和上升阶段拟合的最佳.因此该组合适合太阳高度角大于 15° 的 U 型反照率日变化曲线的拟合,不适合太阳高度角大于 5° 的偏 M 型反照率日变化曲线的拟合.耿贝尔组合对第一个峰值在反照率和峰值位置方面拟合均好,但对第二个峰值拟合相对较差.拟合的第二峰值在反照率上偏低,在峰值位置上偏早.拟合的午时前后部分非常平坦,并且拟合的反照率偏高.耿贝尔组合在计算上又比其他组合多 1 个计算步骤.拉普拉斯组合拟合最好.它的峰值比较尖,对第一峰值和第二峰值的反照率拟合的稍高,对 2 个峰值的位置拟合最佳.午时前后光滑过度,只是比实测值拟合较低.另外,根据其他 3

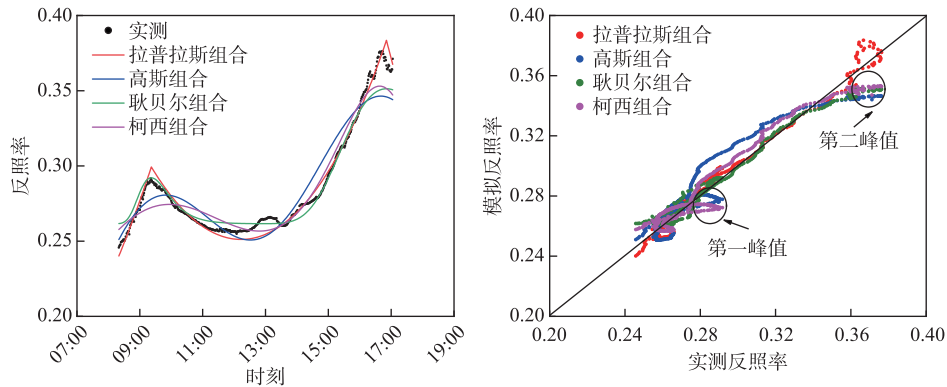


图 4 2019 年 1 月 29 日太阳高度角 $\geq 5^\circ$ 时间范围的 4 种组合统计模型拟合曲线和拟合效果对比：
(a) 组合统计模型拟合的反照率日变化曲线, (b) 实测和组合统计模型拟合反照率对比

Fig.4 Comparison of the fitted results for the measured albedo over 5° solar elevation angle on 29 January, 2019 by using the four combined statistical models

种组合在单峰及谷值的拟合曲线特点,也没有必要选择不同密度分布函数进行线性组合。

图 4b 给出 2019 年 1 月 9 日 4 种组合统计模型拟合结果与观测结果的关系。图中的实测反照率数据 518 个,它们的变化范围在 0.25~0.38 之间。其中 2 个圆圈的位置为第一峰值和第二峰值对应的高斯组合、耿贝尔组合和柯西组合的拟合结果,它们均小于观测结果。唯有拉普拉斯组合在实测范围内表现良好。表 4 的相关系数均大于 0.9517,均方根误差小于 0.0108,平均绝对误差小于 0.0089。这说明仅从表 4 数据量级上不能直接剔除哪种组合不可信,但相关系数和误差的微小差别仍然反映拉普拉斯组合效果最佳。

表 5 2019 年 1 月—2 月 12 天太阳高度角 $\geq 5^\circ$ 时间范围反照率的 4 种组合统计模型拟合误差分析
Tab.5 Error analysis for the 12 days measured albedo over 5° solar elevation angle in January–February, 2019 by using the four combined statistical models

	拉普拉斯组合	高斯组合	耿贝尔组合	柯西组合
均方根误差	0.0106	0.0164	0.0112	0.0154
绝对平均误差	0.0075	0.0125	0.0080	0.0112

整个调查期间 12 个晴天的太阳高度角 $\geq 5^\circ$ 的反照率数据 6231 个,将它们做与图 4b 相同的分析,得到 4 种组合统计模型拟合结果与观测结果的关系(图 5)。图 5 直观地表明拉普拉斯组合统计模型的数据散点分布均衡,而其他 3 种组合都明显存在拟合峰值偏小所带来的明显偏差。表 5 的误差分析数据又进一步证实拉普拉斯组合的误差小于 0.0108,是最佳组合统计模型。在此基础上,

图 6 给出 2019 年 1 月—2 月 12 条晴天反照率日变化的拉普拉斯组合统计模型拟合曲线。它更直观地表现拉普拉斯组合统计模型的效果。表 6 所给的逐日拉普拉斯组合统计模型拟合相关系数、均方根误差和平均绝对误差显示了每一日结果的可靠性。12 天当中,最大误差为 0.016。此外,表 6 还给出了拟合的拉普拉斯组合统计模型综合系数 a_1 和 a_2 。

从表 6 中的综合系数看,它们有一定的变化。这 2 个系数决定反照率的整体高低,它们的差异说明湖冰表面反照率日变化除了太阳辐射角和云量影响外,还会有其他次要因素。理论上,气象因素(云^[19]和温度^[25])以及冰物理因素(冰厚度、冰面粗糙度和沙尘等污物)均包含在拉普拉斯组合统计模式的综合系数 a_1 和 a_2 中。表 6 中 a_1 的最大值和最小值分别为 0.0709 和 0.1088,均值为 0.0944,均方差为 0.0071。 a_2 的最大值和最小值分别为 0.1232 和 0.1816,均值为 0.1397,均方差为 0.0151。如果 a_1 和 a_2 均值减或加 3 倍均方差,所得结果分别接近 a_1 和 a_2 的最小值和最大值。将 a_1 和 a_2 的均值减 3 倍均方差、均值、均值加 3 倍均方差分别代入式(1)~(4)的 12 天拟合公式中来代替 a_1 和 a_2 进行计算。发现 12 日均使用均值,一日内反照率的差异小于 5%。但采用减或加 3 倍均方差计算,可产生 16% 的差异。因此,如果不考虑次要影响因素,采用拉普拉斯组合统计模型的平均综合系数直接建立冰面反照率日变化模型,会构成大约 ± 0.01 的绝对误差。

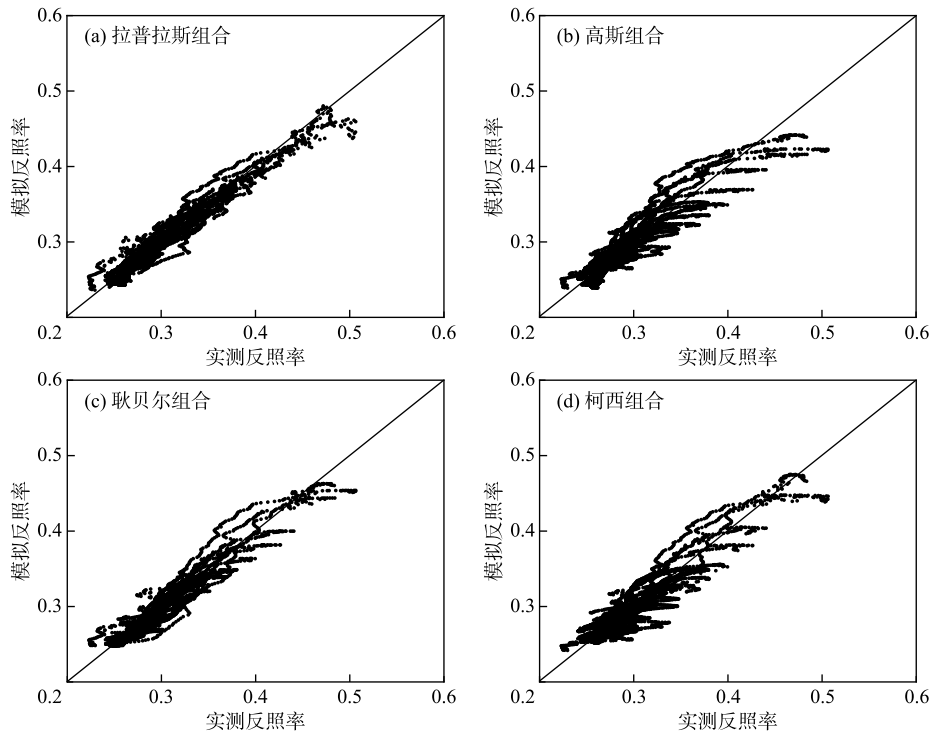


图 5 2019 年 1—2 月 12 个晴天太阳高度角 $\geq 5^\circ$ 时间范围反照率的 4 种组合统计模型拟合效果对比
 Fig.5 Comparison of the fitted results for the 12 days measured albedo over 5° solar elevation angle in January–February, 2019 by using the four combined statistical models

表 6 拉普拉斯组合拟合 2019 年 1—2 月 12 个晴天太阳高度角 $> 5^\circ$ 反照率日变化的相关系数、误差和综合拟合系数 a_1 和 a_2

Tab.6 Correlation coefficients, errors and fitted coefficients a_1 and a_2 for the 12 days measured albedo over 5° solar elevation angle in January–February, 2019 by using Laplace combined statistical model

	2019-01-16	2019-01-20	2019-01-22	2019-01-23	2019-01-25	2019-01-29
相关系数	0.9761	0.9840	0.9586	0.9847	0.9672	0.9896
均方根误差	0.0115	0.0089	0.0155	0.0074	0.0103	0.0049
绝对平均误差	0.0094	0.0068	0.0098	0.0060	0.0083	0.0038
综合系数 a_1	0.1014	0.0938	0.0936	0.0949	0.0921	0.0903
综合系数 a_2	0.1458	0.1449	0.1472	0.1377	0.1338	0.1315
	2019-01-31	2019-02-01	2019-02-03	2019-02-04	2019-02-08	2019-02-11
相关系数	0.9259	0.9713	0.9844	0.9159	0.9189	0.9420
均方根误差	0.0093	0.0084	0.0059	0.0075	0.0141	0.0101
绝对平均误差	0.0071	0.0060	0.0048	0.0052	0.0117	0.0074
综合系数 a_1	0.0961	0.0942	0.0946	0.0779	0.1088	0.0956
综合系数 a_2	0.1232	0.1342	0.1329	0.1816	0.1261	0.1373

我国北方大部分地区属于干旱和半干旱,内陆湖泊、河流冰面会存在沙尘. 沙尘越多反照率越低^[26],冰川冰^[12,25]和海冰^[27]都有报道. 从理论研究出发,随着对湖冰反照率机理认识的提高,应该逐步从综合系数中定量分离出其他气象、冰物理、大气沉降物的贡献. 另外,乌梁素海冬季日内最大太阳高度角是 35° ,统计

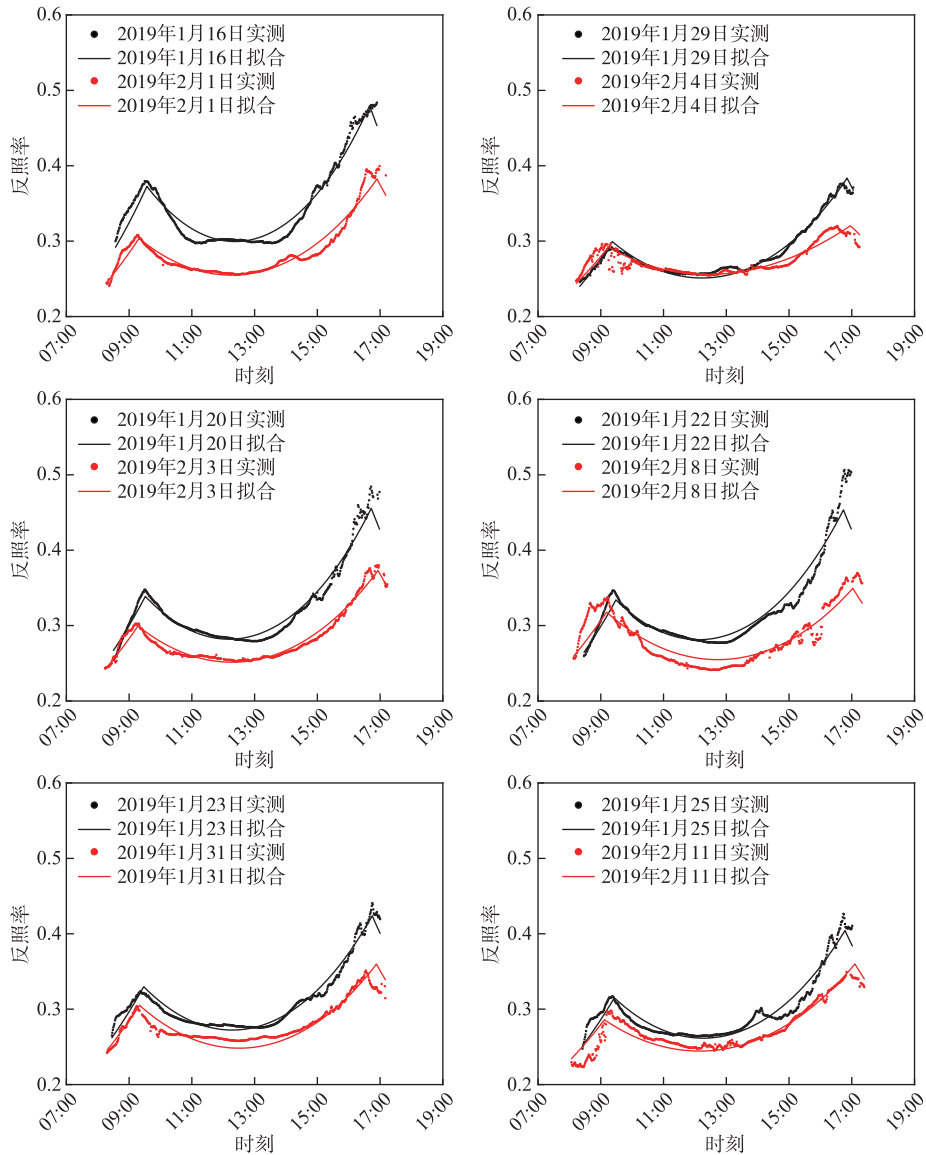


图6 2019年1—2月12个晴天太阳高度角 $>5^\circ$ 反照率的拉普拉斯组合拟合曲线

Fig.6 Fitted curves for the 12 days measured albedo over 5° solar elevation angle in January–February, 2019 by using Laplace combined statistical model

模式对于太阳高度角超出 35° 时, 本文统计方式的适用性需要现场验证. 但是目前的数学模型, 结合冰面总辐射, 可以为驱动冰下水体辐射能量, 进而驱动冰下水生态系统变化提供输入. 也能为内蒙古“一湖两海”、青藏高原黄河源的冰下水体水环境和生态研究及应用提供支持.

4 结论

1) 利用 Trios 高光谱辐射传感器实现每分钟 1 次辐射数据采集, 能够获得从日出到日落的高精度辐射通量, 计算得到表面反照率. 乌梁素海湖冰晴天反照率日变化表现出日出后和日落前各有一峰值, 峰值出现时刻与日出时刻有关. 2 个峰值不等, 具有明显不对称性. 少云天的反照率日变化仍保留双峰特征, 但曲线

具有噪音信号,并且第一峰值出现时刻相对延迟,第二峰值出现时刻则提前。多云到阴天情况下的反照率偏低,根据多云和阴出现时间,可以缺失第一峰值或者第二峰值。全阴天的反照率基本保持稳定不变。

2)提出的4种概率密度分布函数组合统计模式,均能模拟具有双峰特征和双峰之间呈U型的反照率日变化曲线。模型中的峰值位置、基本尺度和尺度参数变形系数与当地日出时刻关系密切,进而解决了北京时和地方时的差异问题。利用太阳高度角 $\geq 5^\circ$ 反照率实测数据拟合,发现拉普拉斯组合统计模型在模型形式、统计参数、绝对误差均为最佳。

3)如果将拉普拉斯组合统计模型的综合系数取12个晴天的平均值,计算得到的反照率与观测值相比的误差不超过5%,因此可以作为湖冰反照率的参数化方案。但从物理机制上讲,云、气温、冰面积雪、冰面沙尘量以及结冰初期和融冰后期冰面水分等次要影响因素均体现在组合统计模型的综合系数中,它们的量化工作还需在未来调查研究成果中积累数据和继续深入。

致谢:感谢内蒙古乌梁素海湿地生态系统国家定位观测研究站提供的现场工作条件和参加野外工作的王庆凯、于森、祖永恒、王绍宇等同学的辛勤劳动。在论文写作过程中得到南京信息工程大学蒋熹、西北大学王宁练、中国科学院遥感与数字地球研究所邱玉宝、陈甫、浙江师范大学林兴辉、芬兰气象研究所程斌的有益建议和讨论,在此一并致谢。

5 参考文献

- [1] Mironov D, Terzhevik A, Kirillin G *et al.* Radiatively driven convection in ice-covered lakes: Observations, scaling, and a mixed layer model. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107**(C4): 7-1-7-16. DOI: 10.1029/2001JC000892.
- [2] Terzhevik A, Golosov S, Palshin N *et al.* Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia. *Aquatic Ecology*, 2009, **43**: 617-627. DOI: 10.1007/s10452-009-9288-x.
- [3] Zhang Y, Li CY, Gao N *et al.* Effect of freezing on eutrophication in Lake Ulansuhai. *J Lake Sci*, 2017, **29**(4): 811-818. DOI: 10.18307/2017.0404. [张岩, 李畅游, 高宁等. 结冰对乌梁素海水体富营养化的影响. 湖泊科学, 2017, **29**(4): 811-818.]
- [4] Yang F, Li CY, Shi XH *et al.* Impact of seasonal ice structure characteristics on ice cover impurity distributions in Lake Ulansuhai. *J Lake Sci*, 2016, **28**(2): 455-462. DOI: 10.18307/2016.0226. [杨芳, 李畅游, 史小红等. 乌梁素海冰封期湖泊冰盖结构特征对污染物分布的影响. 湖泊科学, 2016, **28**(2): 455-462.]
- [5] Lv HZ, Li CY, Shi XH *et al.* Pollutant distribution under different conditions in Lake Ulansuhai ice-water system. *J Lake Sci*, 2015, **27**(6): 1151-1158. DOI: 10.18307/2015.0621. [吕宏洲, 李畅游, 史小红等. 不同条件下乌梁素海污染物在冰-水体系中分布规律的模拟. 湖泊科学, 2015, **27**(6): 1151-1158.]
- [6] Jiang T, Zhang S, Zhao SN *et al.* Distribution and migration characteristics of salinity in ice-water-sediment in Lake Ulansuhai. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 969-975. DOI: 10.18307/2019.0424. [姜涛, 张生, 赵胜男等. 乌梁素海盐分在冰-水-沉积物间的分布及迁移特征. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 969-975.]
- [7] Petrov, MP, Sutyryn GG. Diurnal cycle of convection in an ice-covered lake. *Meteorol Gidrolog*, 1984, (1): 91-98.
- [8] Pushistov PY, Ievlev KV. Numerical eddy-resolving model of non-stationary penetrative convection in spring solar heating of ice-covered lakes. *Bull Inst Comput Math Math Geophys*, 2000, **5**: 55-63.
- [9] Granin NG, Jewson D, Gnatovskii RY *et al.* Turbulent mixing in the water layer just below the ice and its role in development of diatomic algae in Lake Baikal. *Doklady Akademii Nauk*, 1999, **366**(6): 835-839.
- [10] Bertilsson S, Burgin A, Cayelan C *et al.* The under-ice microbiome of seasonally frozen lakes. *Limnology and Oceanography*, 2013, **58**(6): 1998-2012. DOI: 10.4319/lo.2013.58.6.1998.
- [11] Bolsenga SJ. Total albedo of Great Lakes ice. *Water Resources Research*, 1969, **5**(5): 1132-1133.
- [12] Jiang X, Wang NL, Pu JC *et al.* The albedo on the Qiyi Glacier in Qilian Mountains during the ablation period. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, (5): 752-760. [蒋熹, 王宁练, 蒲健辰等. 夏季消融期祁连山“七一”冰川反照率初步研究. 冰川冻土, 2008, (5): 752-760.]
- [13] Wang XW, Zender CS. Arctic and Antarctic diurnal and seasonal variations of snow albedo from multiyear Baseline Surface Radiation Network measurements. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2011, **116**(3). DOI: 10.1029/2010JF001864.

- [14] Yao T, Zhang Q. Study on land-surface albedo over different types of underlying surfaces in North China. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(8): 089201. DOI: 10.7498/aps.63.089201. [姚彤, 张强. 我国北方不同类型下垫面地表反照率特征. 物理学报, 2014, **63**(8): 089201.]
- [15] Norsang, Jin YM, Tsoja WM *et al.* Ground-based measurements of global solar radiation and UV radiation in Tibet. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, **39**(6): 1683-1688. [诺桑, 晋亚铭, 措加旺姆等. 西藏地面太阳总辐射与紫外线的观测. 光谱学与光谱分析, 2019, **39**(6): 1683-1688.]
- [16] Xiao Y, Zhao L, Li R *et al.* The characteristics of surface albedo in permafrost regions of Northern Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(3): 480-488. [肖瑶, 赵林, 李韧等. 藏北高原多年冻土区地表反照率特征分析. 冰川冻土, 2010, **32**(3): 480-488.]
- [17] Sun J, Hu ZY, Xun XY *et al.* Albedo characteristics in different underlying surfaces in mid and upper-reaches of Heife and its impact factor analysis. *Plateau Meteorology*, 2011, **30**(3): 607-613. [孙俊, 胡泽勇, 荀学义等. 黑河中上游不同下垫面反照率特征及其影响因子分析. 高原气象, 2011, **30**(3): 607-613.]
- [18] Bolsenga SJ, Greene GM, Blizard MA. Techniques to measure the spectral reflectance of ice. *SPIE Proceedings (Ocean Optics VII)*, 1984, **489**: 484-391. DOI: 10.1117/12.943326.
- [19] Minnis P, Mayor S, Smith WL *et al.* Asymmetry in the diurnal variation of surface albedo. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, **35**(4): 879-890. DOI: 10.1109/36.602530.
- [20] Wen LJ, Lv SH, Chen SQ *et al.* Observation study on diurnal asymmetry in surface albedo of oasis in arid region. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2009, **30**(7): 953-956. [文莉娟, 吕世华, 陈世强等. 干旱区绿洲地表反照率不对称观测研究. 太阳能学报, 2009, **30**(7): 953-956.]
- [21] Cao YQ, Zhang W, Yao JY *et al.* Variation of cloud fraction and its relationship with solar radiation over semi-arid region. *Journal of Arid Meteorology*, 2015, **33**(4): 684-693. [曹越前, 张武, 药静宇等. 半干旱区云量变化特征及其与太阳辐射关系的研究. 干旱气象, 2015, **33**(4): 684-693.]
- [22] Zhang R, Ke CQ, Xie HJ *et al.* Surface albedo measurements over sea ice in the Arctic ocean during summer 2010. *Chinese Journal of Polar Research*, 2012, **24**(3): 299-306. DOI: 10.3724/SP.J.1084.2012.00299. [章睿, 柯长青, 谢红接等. 2010年夏季北极海冰反照率的观测研究. 极地研究, 2012, **24**(3): 299-306.]
- [23] Chen JW, Zuo HC, Wang Y *et al.* Parameterization scheme about albedo changing with solar altitude angle over different underlying surface in arid areas of Northwest China. *Plateau Meteorology*, 2014, **33**(1): 80-88. [陈继伟, 左洪超, 王颖等. 西北干旱区不同下垫面反照率随太阳高度角变化的参数化方案. 高原气象, 2014, **33**(1): 80-88.]
- [24] Yu YQ, Liu SS, Li HD *et al.* Formula derivation and application of solar elevation angle. *Journal of Henan University of Engineering*, 2017, **29**(3): 77-80. [于琼燕, 刘帅帅, 李海东等. 太阳高度角计算公式及光伏应用. 河南工程学院学报:自然科学版, 2017, **29**(3): 77-80.]
- [25] Jiang X, Wang NL, He JQ *et al.* A study of parameterization of albedo on the Qi Yi Glacier in Qilian Mountains, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(1): 30-37. [蒋熹, 王宁练, 贺建桥等. 祁连山七一冰川反照率的参数化研究. 冰川冻土, 2011, **33**(1): 30-37.]
- [26] Zhang YL, Kang SC. Research progress of light-absorbing impurities in glaciers of the Tibetan Plateau and its surroundings. *Chinese Science Bulletin*, 2017, **62**(35): 4151-4162. DOI: 10.1360/N972017-00505. [张玉兰, 康世昌. 青藏高原及周边地区冰川中吸光性杂质及其影响研究进展. 科学通报, 2017, **62**(35): 4151-4162.]
- [27] Yang YZ, Xu ZT, Sun ZH *et al.* Design and application of hyperspectral radiation system for sea ice observation. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(6): 1610-1613. [杨跃忠, 许占堂, 孙兆华等. 海冰高光谱辐射测量系统的设计及应用. 光谱学与光谱分析, 2010, **30**(6): 1610-1613.]