

海冰表面和底层形态的特征相关性分析 ——以 2011 年早春拉布拉多海海冰实验数据为例

李星星^{1,2,3}, 张 晰^{2,3}, 包 萌^{2,3}, 孟俊敏^{2,3}, 刘根旺^{2,3}

(1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590; 2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3. 自然资源部海洋遥测技术创新中心, 山东 青岛 266061)

摘要: 海冰表面和底层形态的特征相关性分析对海冰分类、气候研究以及海冰厚度估计等方面具有重要作用。目前, 海冰底层形态的研究较少, 且缺乏海冰表面和底层形态的相关性研究。针对这一问题, 本文利用加拿大渔业和海洋局提供的积雪表面粗糙度高度(定义为海冰或积雪表面相对于周围平整表面的高度)、海冰底层轮廓、积雪深度以及海冰厚度数据, 采用均方根高度等 7 个粗糙度参数对海冰表面和底层粗糙度特征进行了分析, 并给出了其概率密度函数。结果表明, 7 个粗糙度参数中, 基于一阶粗糙度参数描述的海冰表面和底层粗糙度与海冰厚度之间存在强相关性, 相关系数均大于 0.680。三阶和四阶粗糙度参数表示的海冰表面和底层粗糙度与海冰厚度之间相关性较弱, 相关系数的绝对值小于 0.2。另外, 基于一阶粗糙度参数描述的海冰表面和底层粗糙度具有强相关性的特点, 相关系数大于 0.740。这对利用海冰表面粗糙度估计底层粗糙度和海冰厚度等方面具有重要作用。

关键词: 海冰; 粗糙度; 相关性; 表面形态; 底层形态

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2022)1-0090-12

DOI: 10.11759/hyxx20210409004

世界大洋 3%~4%的面积被海冰覆盖, 作为全球海气系统中的重要要素, 影响着海洋和大气之间的动量、热量和质量交换^[1]。在众多的海冰参数中, 海冰表面和底层形态的研究是掌握气候变化、海冰类型划分和预估海冰厚度的关键环节。首先, 在气候变化研究方面, 海冰表面形态影响着大气-海冰-海洋之间的质量和能量平衡^[2-3], 对空气-海冰和海冰-海水的阻力系数造成一定的影响^[4-7]。在海冰厚度估计方面, 海冰表面形态与海冰厚度之间具有很强的相关性^[8], 根据浮体定律, 海冰表面高度是海冰厚度和密度的函数^[9], 但是可变的海冰表面粗糙度是海冰厚度估计中一个常被忽略的参数, 是海冰厚度估计不确定性的主要来源, 不确定性最高可达 30%^[10]。在海冰类型识别方面, 不同的海冰类型海冰表面粗糙度具有不同的统计特性, 据此可以将较厚的一年冰和多年冰区分开, 并且能将其与较薄的海冰区分开^[11]。因此, 准确估计海冰厚度和识别海冰类型需要详细了解海冰表面粗糙度的统计特性。

海冰底层形态具有同等重要的作用, 海冰下表面形态是冰和水相互作用的结果, 影响海气系统的交换过程和速率^[12]; 海冰底层形态的深入研究在利

用海冰形态估计海冰厚度方面具有重要作用^[13]; 海冰底层形态与冰龄之间存在一定的对应关系, 在海冰类型识别方面能够作为补充依据, 提高海冰类型识别精度^[14]。在海上作业方面, 海冰的形变(例如脊帆和龙骨)特征影响着近海石油勘探和生产结构的设计, 还会阻碍航行, 冲刷海床, 损坏海底设施。综上, 海冰表层和底层形态研究一直是近海结构载荷评估^[15]、大范围海冰厚度估计^[13]、海气系统研究以及海冰类型识别的重要内容。

经过多年的技术发展, 激光扫描仪、激光高度计、合成孔径雷达以及仰视声呐等多种技术手段已成功用于测量海冰表面形态和底层形态特征和参

收稿日期: 2021-04-09; 修回日期: 2021-07-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1407203), 国家自然科学基金(41976173), 中欧国际合作龙计划项目(577889)

[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No. 2018YFC1407203; National Nature Science Foundation of China, No. 41976173; Ministry of Science and Technology of China and the European Space Agency through the Dragon-5 Program, No. 577889]

作者简介: 李星星(1997—), 女, 河南平顶山人, 硕士研究生, 主要从事海冰微波探测, 电话, 13276900152, E-mail: lixxde@163.com; 张晰(1981—), 男, 山东潍坊人, 通信作者, 研究员, 主要从事 SAR 成像与信息提取一体化, E-mail: xi.zhang@fio.org.cn

数。Han 等^[16]利用地面激光扫描仪获取了北极夏季海冰表面数字模型,评估了双极化 X 波段 SAR 特征与海冰表面粗糙度的关系。Liu 等^[17]利用激光扫描仪获取了 2011—2012 年冬季渤海东海岸五个原位点的点云数据,距离为 10 m,扫描分辨率为 4~6 mm;并通过获取的三维坐标数据计算了海冰表面粗糙度,评估了海冰表面的形态特征。Beckers 等^[18]在评估海冰表面粗糙度时也用到激光扫描仪。在利用激光高度计获取海冰表面形态数据方面,Saldern 等^[11]利用激光高度计获得海冰表面轮廓数据对海冰表面粗糙度进行统计成功地区分了海冰类型。Gupta 等^[19]利用激光高度计获取的海冰表面数据对北极边缘海冰带进行表面粗糙度的探测与分类。从以上分析可以看出,激光扫描仪和激光高度计都能够提供较为真实的海冰表面形态特征,为 SAR 特征评估海冰表面粗糙度提供了基础。例如,Fors 等^[20]研究了夏末季节北极海冰表面粗糙度(激光高度计获取的数据)对 C 波段全极化 SAR 特征的影响。Cafarella 等^[21]分析了加拿大北极群岛一年平整冰和变形冰的 C 波段以及 L 波段的 SAR 后向散射特性与海冰表面粗糙度的关系。海冰表面粗糙度数据是利用激光扫描仪获取的。

与激光扫描仪和激光高度计不同,仰视声呐是在海冰底部通过向上观测的方式获取海冰下表面形态特征,即通过声呐图像提取海冰下表面的形态特征。在这方面 Lucier^[22]等利用水下声呐的方法表征南极小尺度海冰结构。Doble 等^[23]利用水下声呐的测量的方法分析了海冰表面高度和吃水深度的关系。

根据各种手段获取的海冰表面和底层的轮廓信息,我们对海冰表面和底层形态特征将会有更加深入的了解,据此可以获取更加丰富的海冰信息。例如,海冰表面形态特征、海冰表面粗糙度与海冰厚度的关系以及海冰表面和底层形态的关系等。

本文主要在以下方面做出改进;(1) 海冰形态的研究往往结合海冰厚度进行,因此,结合海冰厚度增加海冰底层粗糙度的分析。除此之外,给出海冰表面和底层粗糙度的概率密度函数以便于整体分析海冰形态。(2) 结合多种粗糙度参数对海冰表面和底层粗糙度相关性进行分析。不同类型粗糙度参数表示的海冰表面和底层形态的相关性差别较大,因此,对各粗糙度参数表征下的海冰表面和底层形态进行详细的相关性分析。

1 数据和海冰形态参数

1.1 研究区域和数据

本文采用的数据为,2011 年 3 月 19—20 日 Prinsenberg 等^[24]在加拿大拉布拉多中部利用直升机机载电磁激光传感器和探地雷达(GPR)收集的海冰厚度、海冰或积雪表面粗糙度高度(定义为海冰或积雪表面相对于周围平整表面的高度)、海冰底层轮廓以及积雪深度数据。研究区域位于 54.9°N—55.8°N, 58.5°W—60.3°W (图 1),海冰类型主要为一年平整冰和一年形变冰,图中红色线和黄色线为飞机飞行轨迹,其中红色线表示平均海冰厚度大于 1.2 m 的区域,黄色线表示平均海冰厚度在 0.5~1.0 m 之间。该区域寒冷多雾,由于受到拉布拉多寒流和格陵兰寒流的影响,海水温度较低,降水季节变化较为均匀。在实验调查前(3 月 17—19 日),该地区的气温为-15 °C,并有降雪,因此,很大一部分的海冰会被降雪覆盖。试验时(19—20 日),该地区气温为-8~-12 °C,风速为 11~15 m/s^[24],根据气象条件该区域表面积雪为干燥的。

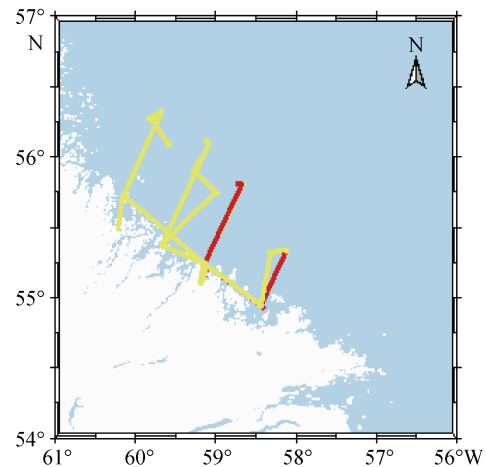


图 1 2011 年拉布拉多海海冰调查区域(红色线和黄色线表示直升机飞行轨迹)

Fig. 1 Sea ice survey area of the Labrador Sea in 2011 (The red and yellow lines indicate helicopter flight trajectories)

注:红色线表示平均海冰厚度大于 1.2 m 的区域,黄色线表示平均海冰厚度在 0.5~1.0 m 之间

海冰的参数主要是利用激光高度计、电磁传感器以及探地雷达(GPR)获得的。激光高度计测量到海冰或积雪表面距离,据此可获得海冰或积雪表面粗糙度高度(定义为海冰或积雪表面相对于周围平整表面的高度),提供电磁传感器在浮冰上方的高度,其

精度为±1.5 cm。电磁传感器测量到冰-水界面的距离, 据此可获得海冰底层轮廓, 根据一维反演模型, 它们一起提供了冰和雪的厚度^[25]。海冰厚度和海冰或积雪表面粗糙度高度(定义为海冰或积雪表面相对于周围平整表面的高度)的采样频率为 10 Hz, 在飞机飞行速度为 80 mph 下, 采样间隔为 3~4 m^[24]。探地雷达具有提供积雪厚度的能力, 中心频率为 1 000 MHz, 扫描速率为每秒 30 次, 飞行速度为 60~80 mph 时, 采样间隔为 1.0~1.5 m, 积雪厚度的测量精度为 1.5 cm。

通过获取的海冰属性数据以及现场拍摄的照片, 主要进行以下工作: (1) 将 GPR 获取的积雪厚度数据与激光高度计和电磁传感器获取的冰和雪厚度等属性数据进行匹配。首先根据两者的经纬度信息, 将两者的飞行轨迹进行匹配。另外, 由于两者采样间隔不同, GPR 数据采样间隔较小, 数据量较大, 因此, 根据同一轨迹下激光高度计和电磁传感器的数据量, 将 GPR 数据等分为相同的数据量, 对每一等份 GPR 数据取均值作为与激光高度计匹配的积雪数据。由于海冰表面积雪会对海冰表面粗糙度产生一定的影响, 我们从积雪表面粗糙度高度数据减去积雪深度数据, 获取了海冰表面粗糙度高度(定义为海冰表面相对于周围平整表面的高度)。(2) 由于该区域存在冰山、冰间水道。根据海冰表面轮廓数据特征, 将二者相关的海冰属性数据进行剔除。最后, 根据飞行轨迹剔除了飞机刚起飞和刚降落时产生的回旋, 弯曲等轨迹的数据。

图 2 给出了经过预处理后 3 月 19 日编号为 FEM11006 的海冰表面粗糙度高度和底层轮廓信息, 飞行线路长度约为 6.5 km。图中, 蓝色曲线表示海冰上表面的粗糙度高度, 分布范围主要集中在 0~0.5 m 之间, 黄色曲线表示海冰底层轮廓, 分布范围较广, 最深处可达-3.9 m。图 2 清楚显示了海冰表面粗糙度高度和吃水深度之间的关系。为了恢复统计相关的表面粗糙度参数和覆盖均匀的海冰表面, 9 条飞行线路一共分为 1 713 段, 每段 200 m^[20]。

1.2 海冰形态参数

海冰表面粗糙度可以用许多不同的参数表示, 最常用的用于评价表面粗糙度的参数有平均高度、均方根高度以及均方根斜率等。本文选取了评估海冰表面的粗糙度特征 7 个参数, 包括均方根高度、高度偏度、高度峰度、平均斜率、均方根斜率、斜率偏度以及斜率峰度。

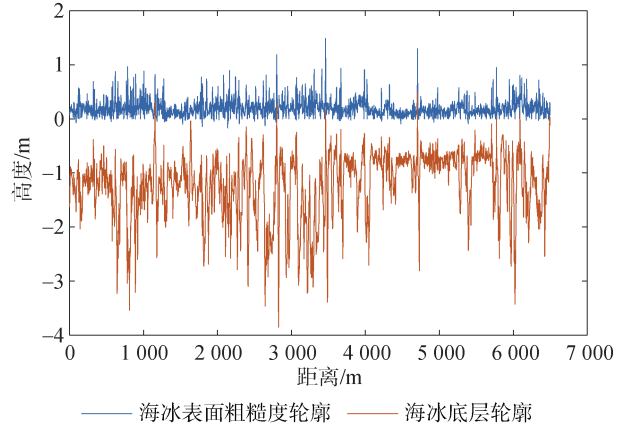


图 2 2011 年 3 月 20 日拉布拉多海的海冰的表面粗糙度(上线)和冰吃水(下线)剖面图示例

Fig. 2 Example of a profile view of the surface roughness (upper line) and ice draught (lower line) of sea ice in the Labrador Sea on March 20, 2011

均方根高度 σ_h 反映了海冰表面高度偏离平均高度的程度, 均方根高度的定义为:

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}, \quad (1)$$

式中, n 代表每个部分中观测的数量, \bar{h} 表示每个部分高于海平面的平均高度, h_i 表示第 i 个高度数据。均方根高度是一个伪参数, 它取决于所研究部分的长度^[24]。

高度偏度 h_{sk} 主要评估海冰表面高度数据分布的偏斜方向以及偏斜程度, 高度偏度的定义如下:

$$h_{sk} = \frac{1}{n\sigma_h^3} \sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^3, \quad (2)$$

高度峰度 h_{ku} 表示海冰表面高度数据的概率密度分布与正态分布相比的尖锐程度。正态分布的峰度为 3, 当数据的峰度大于 3 时, 其分布比正太分布尖锐; 反之, 比正态分布平缓, 其定义为:

$$h_{ku} = \frac{1}{n\sigma_h^4} \sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^4, \sigma_h = Srms, \quad (3)$$

均方根斜率 σ_r 是描述海冰表面粗糙度的一种复合参数。海冰表面平均斜率 \bar{S} 的定义为:

$$\bar{S} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} S_i, S_i = \left| \frac{h_{i+1} - h_i}{x_{i+1} - x_i} \right|, \quad (4)$$

其中, x_i 表示高度数据 h_i 对应的坐标。均方根斜率的定义为:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (S_i - \bar{S})^2}, \quad (5)$$

斜率偏度 R_{sk} 和斜率峰度 R_{ku} 的定义如下:

$$R_{sk} = \frac{1}{(n-1)\sigma_r^3} \sum_{i=1}^{n-1} (S_i - \bar{S})^3, \quad (6)$$

$$R_{ku} = \frac{1}{(n-1)\sigma_r^4} \sum_{i=1}^{n-1} (S_i - \bar{S})^4, \quad (7)$$

均方根高度、平均斜率、均方根斜率为二阶粗糙度参数, 高度偏度和斜率偏度为三阶粗糙度, 高度峰度以及斜率峰度为四阶粗糙度参数。本文依据上述 7 个公式对海冰上、下表面的粗糙度特征进行了描述。另外, 结合概率密度函数分析海冰表面和底层形态的分布特征。

本文采用和方差(SSE)、确定系数(R-square)以及均方根误差(RMSE)三个参数对海冰表面粗糙度与厚度、底层粗糙度与厚度、表面和底层粗糙度之间的拟合模型进行评估。和方差和均方根误差越接近 0, 确定系数越接近 1 表明拟合效果越好。

2 海冰表面和底层形态特征

2.1 海冰表面粗糙度特征与海冰厚度相关性分析

图 3 给出了海冰表面粗糙度与海冰厚度的线性回归模型, 横坐标表示海冰厚度, 纵坐标表示粗糙度。图 3a、图 3d 和图 3e 显示, 在海冰厚度为 0~2.5 m 范围内, 海冰表面一阶粗糙度随着海冰厚度的增加而增加, 与海冰厚度之间存在较强的相关性, 相关系数 R 最小为 0.686, 平均斜率与海冰厚度的相关性最强, 相关系数 R 为 0.796。另外, 海冰表面平均斜率和均方根斜率变化范围相似, 分别在 0.01~0.09 和 0.01~0.08 之间。这表明在描述拉布拉多海冰表面粗糙度方面, 平均斜率和均方根斜率可能具有同等作用, 2.4 节将进行更一步的描述。

三阶和四阶粗糙度参数与海冰厚度的相关性较弱, 相关系数 R 均小于 -0.1(图 3b、图 3c、图 3f 和图 3g)。这表明随着海冰厚度的增大, 三阶和四阶粗糙度参数的取值范围变小, 海冰表面高度和斜率的偏斜程度以及中心峰值变小。另外, 三阶和四阶粗糙度参数在显示海冰表面高度和斜率分布特征方面具有重要作用。高度偏度主要集中在 1~2 之间(图 3b), 斜率偏度主要集中在 0.5~2 之间(图 3f), 这表明海冰表面高度和斜率的偏斜程度较低。高度峰度和斜率峰度主要集中在 4 以内(图 3c 和图 3g), 这表明海冰表面高度斜率分布具有较为平缓的中心峰值。海冰

表面高度和斜率的分布特征以及一阶粗糙度的分布范围表明海冰表面具有较为光滑的特征。

以上分析可以看出, 拉布拉多海沿岸的海冰表面一阶粗糙度与海冰厚度具有较强的相关性, 这表明利用海冰表面粗糙度估计海冰厚度是可行的, 具体的精度需要进一步的分析。三阶和四阶粗糙度与海冰厚度的相关性较弱。

2.2 海冰底层粗糙度特征与海冰厚度相关性分析

图 4 给出了海冰底层粗糙度与海冰厚度的线性回归模型, 横坐标表示海冰厚度, 纵坐标表示粗糙度。图 3 和图 4 对比发现, 海冰底层一阶粗糙度同样随着海冰厚度的增加而增加(图 4a、d、e), 与海冰厚度均存在较强的相关性, 相关系数 R 最小值为 0.695。海冰底层高度和斜率的偏斜程度也较低, 偏度范围分别为 -1~0.5 和 0.5~1.5(图 4b 和图 4f)。峰度的分布范围主要集中在 2~4 之间(图 4c 和图 4g), 三阶和四阶参数表明海冰底层高度和斜率分布具有较为平缓的特征, 并且三阶和四阶粗糙度与海冰厚度的相关性较弱, 相关系数 R 的绝对值均小于 0.2。但必须指出的是, 海冰底层仅有高度偏度与海冰厚度存在微弱的负相关特征(图 4c)。除此之外, 海冰底层粗糙度的变化范围远大于表面, 说明海冰底层比海冰表面更为粗糙。例如, 海冰表面和底层均方根高度的分布范围分别为 0.057~0.407 m 和 0.059~1.139 m (图 3a 和图 4a), 底层均方根高度比表面高出约 0.730 m。同样, 海冰底层平均斜率和均方根斜率的分布范围也更广(图 4d、图 4e 和图 3d、图 3e)。因此, 从分布范围来看, 海冰底层比海冰表面更为粗糙。目前, 在海冰厚度与海冰表面及底层粗糙度相关性研究方面, 粗糙度参数选取较为单一, 且并未定量分析海冰厚度与海冰表面及底层粗糙度之间的关系^[26]。而本文分析了不同类型粗糙度参数下海冰厚度与海冰表面和底层粗糙度的相关性, 并给出了关系模型。

与海冰表面粗糙度分布特征相似, 海冰底层一阶粗糙度与海冰厚度具有较强相关性的特点。因此, 结合海冰表面和底层粗糙度对提高估计海冰厚度的精度具有重要作用。另外, 各粗糙度的分布范围表明海冰底层比海冰表面更为粗糙, 这将会在 2.3 节结合概率密度函数进行详细描述。较为粗糙的原因可能是因为海冰底层受到海水与海冰相互作用、融水渗

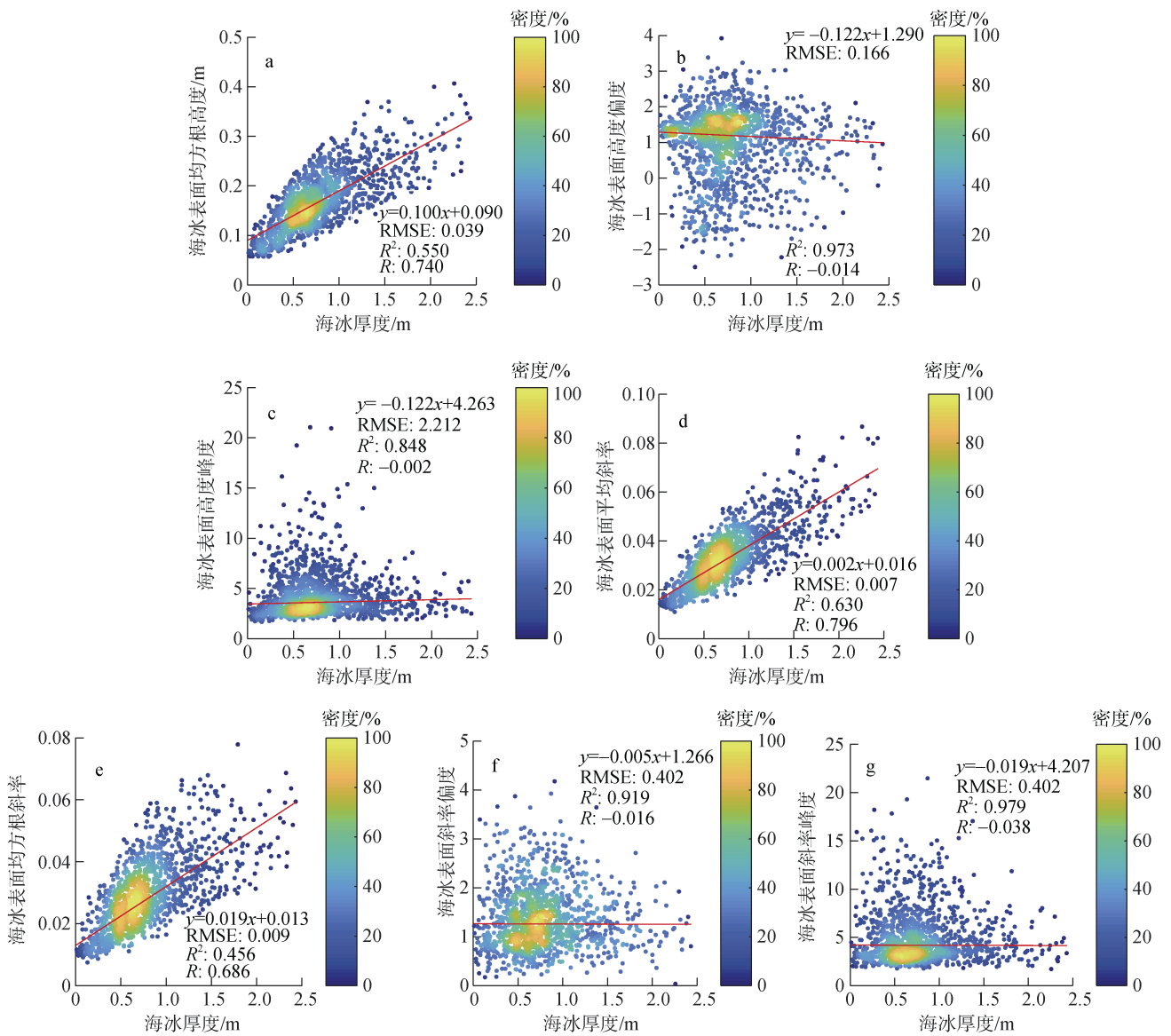


图 3 海冰厚度与海冰表面粗糙度参数的散点图以及线性回归模型及拟合效果

Fig. 3 Scatter plot and linear regression of sea ice thickness and sea ice surface roughness parameters with the fitting effect evaluated

滤、重力迁移等因素的影响。海冰底层的平均斜率以及均方根斜率同样具有相似的分布，这表明不同粗糙度参数之间可能存在一定的相关性，这将会在 2.4 节进行验证。最后，根据海冰表面和底层一阶粗糙度均与海冰厚度存在较强相关性的特点，可以假设海冰表面和底层粗糙度存在一定的相关性，这将在 2.4 节进行分析。

2.3 海冰表面和底层粗糙度的概率密度函数特征

概率密度函数对整体评估拉不拉多海沿岸海冰

的表面和底层粗糙度具有重要意义，根据概率密度函数可以获得累积概率分布。图 5a~图 5g 给出了海冰表面和底层各粗糙度参数的频率分布特征，黄色和紫色部分表示表面和底层频率分布特征。基于此，本文对海冰表面和底层粗糙度的概率密度进行了分析，发现海冰表面和底层粗糙度的概率密度函数为一维高斯函数(其函数形式为指数型)，这与 Peterson 等^[9]指出海冰表面粗糙度的概率密度函数为指数型函数的特征吻合。图 5 中蓝色和红色曲线表示拟合的表面和底层概率密度曲线。图 6a~图 6g 给出了累积经验概率分布以及拟合的累积概率分布。

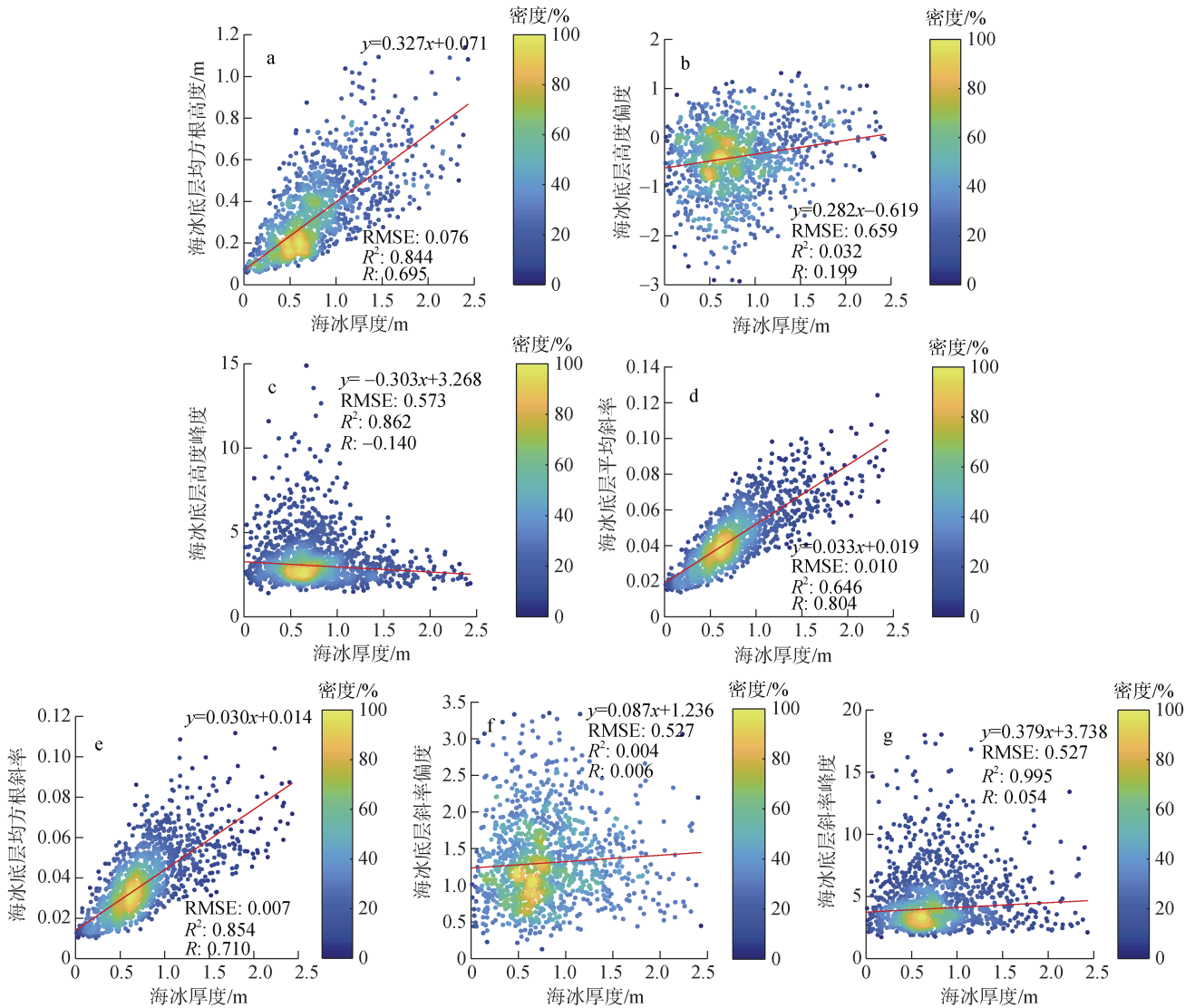


图 4 海冰厚度与海冰底层粗糙度参数的散点图以及线性回归模型以及拟合效果

Fig. 4 Scatter plot and linear regression of sea ice thickness and sea ice bottom roughness parameters with the fitting effect evaluated

海冰表面和底层粗糙度的概率密度函数均符合一维高斯函数，但有许多不同的特点。表面和底层的均方根高度的均值分别为 0.232 m 和 0.599 m，均方根高度小于 0.3 m 分别占 95% 和 50%，这表明海冰底层比表面更为粗糙(图 5a 和图 6a)。另外，高度偏差的均值分别为 -0.432 和 0.954，海冰表面和底层高度的偏斜状态差别较为明显(图 5b 和图 6b)。

图 5c 和图 6c 显示，海冰表面和底层的高度峰度均值分别为 4.254 和 3.257，且峰度系数小于 3 的占 50%，这表明海冰表面和底层高度分布的中心峰值较为平缓。海冰表面和底层平均斜率、均方根斜率、斜率偏差和峰度的分布范围以及均值都较为接近(图 5d、图 5e、图 5f 和图 5g)，这可能是在计算过程

中引入了采样间隔，削弱了海冰表面高度和底层高度偏离平均高度的程度。这是海冰表面和底层粗糙度分布特征相似的地方。

图 5 和图 6 显示，一阶粗糙度参数中，海冰表面和底层均方根高度的分布特征的区别较为明显，突出了海冰底层更为粗糙的特征。三阶以及四阶粗糙度参数中，仅有高度偏差的区别较为明显。因此，在分析海冰表面和底层粗糙度的区别与联系时，应综合不同的粗糙度参数进行评估，以避免信息的不完整。另外，根据拟合的概率密度函数可以估计未统计部分的粗糙度特征，例如获得 0~0.2 m 范围内均方根高度的分布特征，但是范围不宜过大以避免造成较大误差。

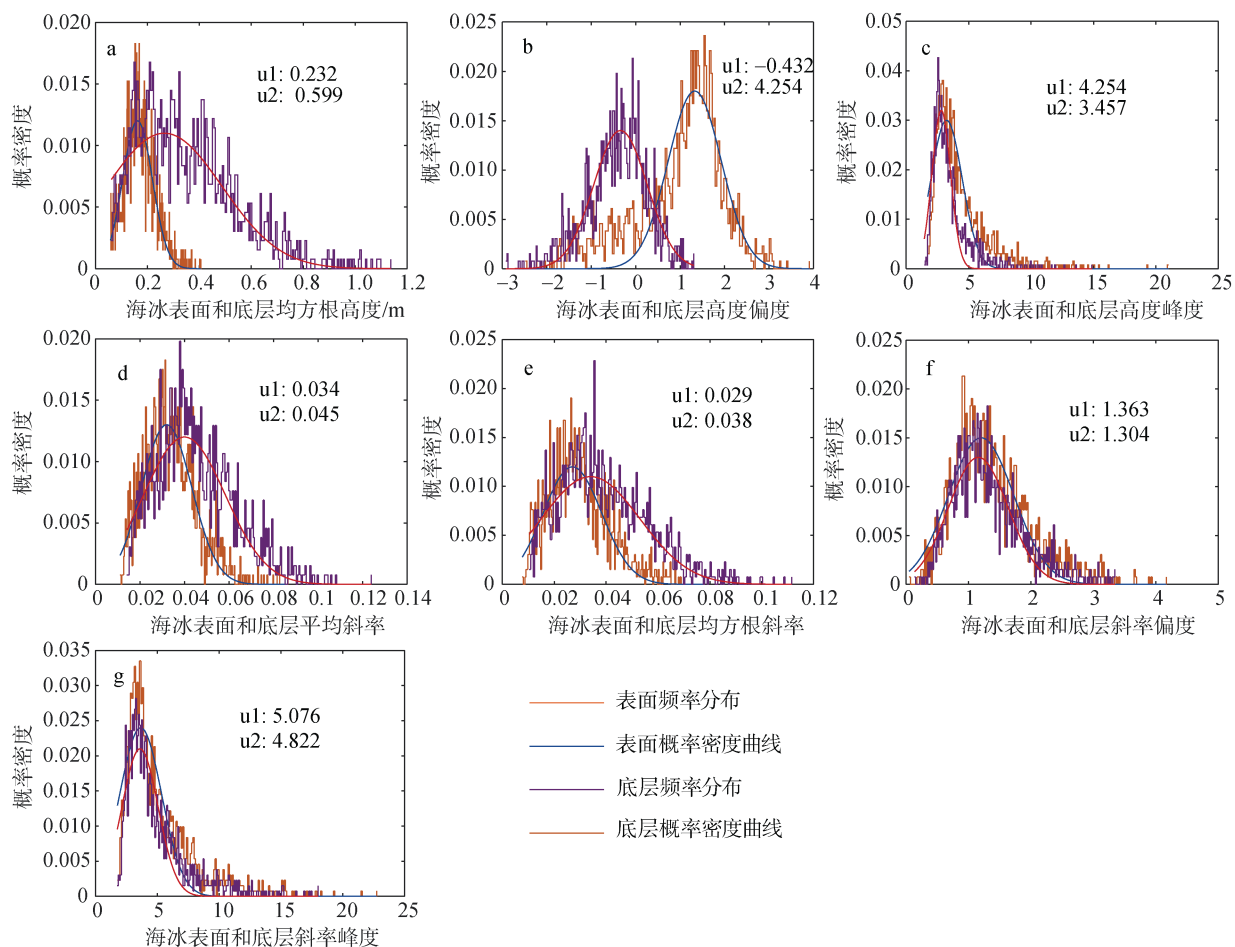


图5 海冰表面和底层各粗糙度参数的概率密度分布特征

Fig. 5 Probability density distribution characteristics of the sea ice surface and bottom roughness parameters

注: 图 5a~图 5g 表示粗糙度参数的频率分布特征及拟合的概率密度曲线; u1 和 u2 分别表示海冰表面和底层粗糙度的均值

海冰表面和底层粗糙度的概率密度函数的参数和拟合效果如表 1 所示, SSE 和 RMSE 值越接近 0 表明拟合效果越好, R^2 越接近 1 表明拟合效果越好。SSE 的最大值为 0.002, R^2 的最小值为 0.803, RMSE 的最大值为 0.003。这表明海冰表面和底层粗糙度的概率密度函数为一维高斯函数。在进行拟合时, 也选取了其他概率密度函数, 但是很难达到一维高斯函数的拟合效果。另外, 概率密度函数受到样本数量等因素的影响, 样本数量以及采样范围等不同, 得到的概率密度函数也会有所变化, 因此在分析海冰表面和底层粗糙度的概率密度函数时, 要充分考虑具体的研究区域以及数据量等。

2.4 海冰表面和底层形态的相关性分析

在进行海冰表面和底层粗糙度相关性分析之前, 首先对各粗糙度参数之间的相关性进行分析。表 2 给出了海冰表面和底层各粗糙度参数之间的相关系数

(右上阴影部分表示海冰表面各粗糙度参数的相关系数, 左下部分表示海冰底层各粗糙度参数的相关系数), 总的来看, 一阶粗糙度参数之间具有显著相关的特点, 相关系数均大于 0.830。部分三阶粗糙度参数与四阶粗糙度参数之间具有较强相关性, 例如, 海冰表面斜率偏度和斜率峰度的相关系数为 0.956, 底层为 0.953。此外还可以看到, 海冰底层高度偏度和峰度之间的相关系数为-0.662; 而海冰表面的相关系数小于 0.4。海冰表面斜率偏度、峰度与高度峰度的相关系数分别为 0.669 和 0.646, 具有较强相关性的特点; 而底层的相关性较低, 相关系数均小于 0.4。这表明各粗糙度参数之间的相关性还与海冰是否为表面有关。

综上, 海冰粗糙度参数中, 一阶统计量之间(例如均方根高度、平均斜率等)之间具有强相关性的特点, 三阶和四阶粗糙参数中, 斜率偏度和峰度之间具有强相关性的特点。除此之外, 各粗糙度参数的相

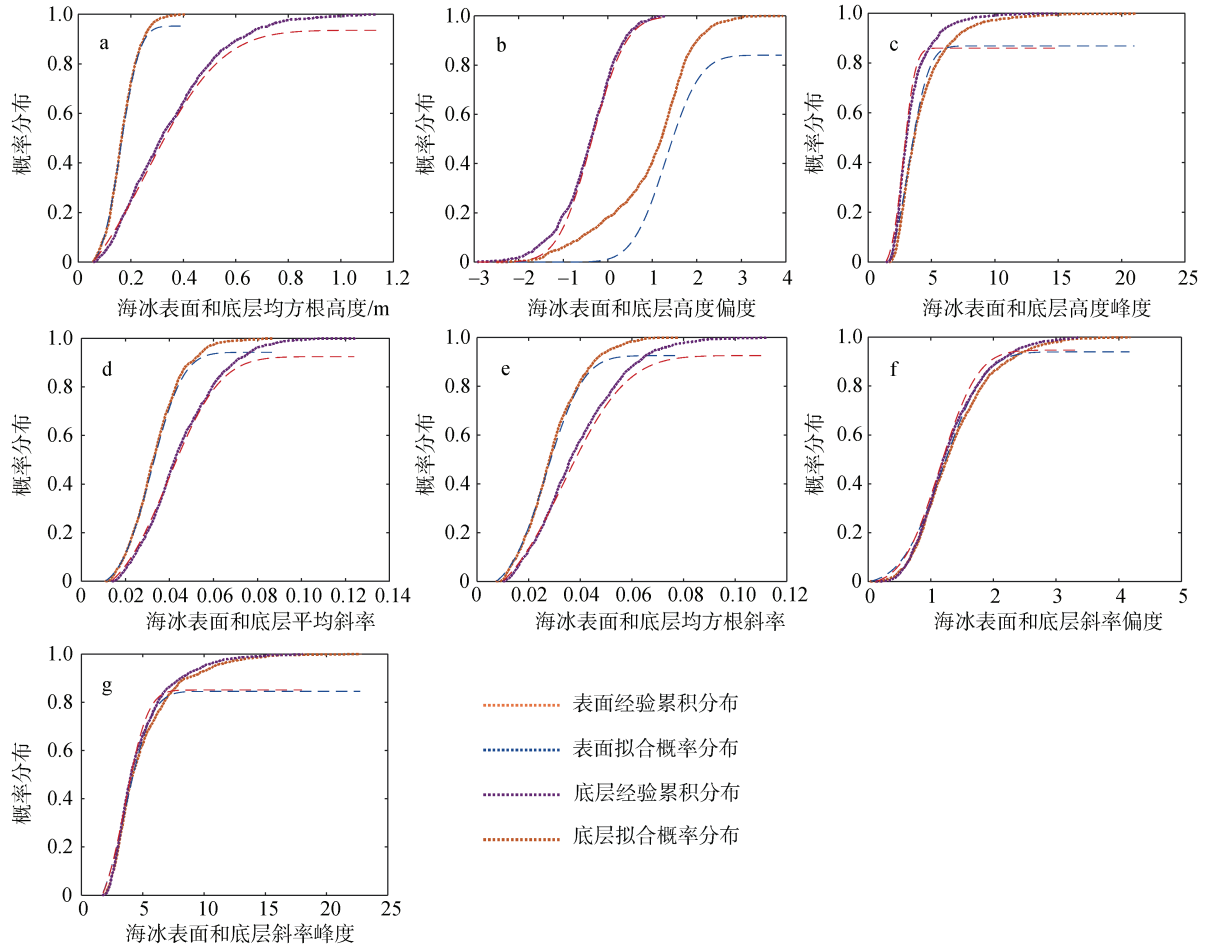


图 6 海冰表面和底层各粗糙度参数的累积概率分布曲线

Fig. 6 Cumulative probability distribution curve of the sea ice surface and bottom roughness parameters

注: 图 6a~图 6g 表示经验累积概率分布和拟合的累积分布曲线

表 1 海冰表面和底层粗糙度概率密度函数的参数以及拟合效果

Tab. 1 Parameters and fitting effect of the probability density function of the sea ice surface and bottom roughness

粗糙度参数	海冰	a	b	c	SSE	R-square	RMSE
σ_h	表面	0.012	0.162	0.081	0.001	0.820	0.002
	底层	0.012	0.265	0.315	0.001	0.820	0.002
h_{sk}	表面	0.018	1.329	0.846	0.001	0.803	0.002
	底层	0.014	-0.342	0.853	0.001	0.816	0.002
h_{ku}	表面	0.030	3.234	1.773	0.002	0.881	0.003
	底层	0.032	2.810	1.054	0.002	0.894	0.003
\bar{s}	表面	0.013	0.032	0.016	0.001	0.865	0.002
	底层	0.012	0.040	0.026	0.001	0.827	0.002
σ_r	表面	0.012	0.027	0.016	0.001	0.809	0.002
	底层	0.011	0.034	0.027	0.001	0.834	0.002
R_{sk}	表面	0.015	1.200	0.742	0.001	0.849	0.002
	底层	0.013	1.155	0.673	0.001	0.818	0.002
R_{ku}	表面	0.024	3.659	2.396	0.002	0.857	0.003
	底层	0.021	3.606	2.071	0.002	0.840	0.003

注: a, b, c 分别表示一维高斯函数的参数

表 2 各粗糙度参数之间的相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients between the roughness parameters

	σ_h	h_{sk}	h_{ku}	\bar{s}	σ_r	R_{sk}	R_{ku}
σ_h	1	0.064	0.192	0.863	0.853	0.159	0.105
h_{sk}	-0.098	1	0.403	0.053	0.176	0.277	0.264
h_{ku}	-0.037	-0.662	1	0.142	0.403	0.669	0.646
\bar{s}	0.832	0.040	-0.053	1	0.895	0.040	-0.001
σ_r	0.846	-0.099	0.088	0.925	1	0.380	0.299
R_{sk}	0.274	-0.349	0.388	0.137	0.407	1	0.956
R_{ku}	0.214	-0.312	0.361	0.101	0.330	0.953	1

注：右上阴影部分表示海冰表面各粗糙度参数的相关系数，左下部分表示海冰底层各粗糙度参数的相关系数

关性需要考虑是海冰表面还是底层。因此，在利用不同的粗糙度参数表征海冰粗糙度时，需结合海冰表面和底层具体分析各个参数之间的相关性，在充分表征海冰形态的同时，对粗糙度参数进行一定的取舍，以减少数据处理过程的冗余信息。

2.1 节和 2.2 节指出，海冰表面和底层的一阶粗糙度均与海冰厚度相关，那么海冰表面和底层粗糙度也可能存在一定的相关性，另外，以往的研究表明海冰表面和底层的粗糙度(方差)存在一定的相关性^[26]。因此，本节接下来对海冰表面和底层粗糙度进行相关性分析。

图 7 给出了海冰表面和底层粗糙度的线性回归模型，横、纵坐标分别表示海冰表面和底层的粗糙度。海冰表面和底层一阶粗糙度的相关系数 R 均大于 0.740，具有较强的相关性(图 7a、图 7d 和图 7e)。海冰表面和底层的斜率偏度相关性较弱，相关系数 R 为 0.421(图 7f)。从物理角度上讲，海冰表面和底层粗糙度具有较高相关性的原因是由静水平衡所致。图 7b、图 7c 和图 7g 显示，三阶、四阶粗糙度参数表征的海冰表面和底层相关性较弱，相关系数均低于 0.4。除了本文列举的粗糙度参数外，一阶粗糙度参数中，海冰表面和底层的最大峰高、最大谷深、最大截面高度以及平均高度等也具有较强相关性的特点，由于篇幅限制，本文未列出其具体特征。

海冰表面和底层粗糙度拟合效果的优劣需结合 R 、RMSE 以及 R^2 值进行综合分析。相关系数 R 的绝对值越大，数据的相关程度越高，离散程度越低，RMSE 值越小，则 R^2 越大，拟合模型对底层粗糙度的解释能力越强。因此，海冰表面和底层粗糙度的拟合优劣依次是平均斜率、均方根斜率、均方根高度、斜率偏度(图 7d、图 7e、图 7a 和图 7f)。其余参数的相关性较弱，拟合效果较差(图 7b、图 7c 和

图 7g)。

由此可以看出，一阶粗糙度参数中，海冰表面和底层的粗糙度均符合线性回归模型。因此，当海冰表面(或底层)粗糙度已知时，可以根据线性回归模型确定海冰底层(或表面)的粗糙度。这对提高海冰厚度估计精度以及气候研究方面具有重要作用。

3 结论

本文利用加拿大渔业与海洋局提供的积雪表面粗糙度高度、冰和雪的厚度、海冰底层轮廓以及积雪深度数据，提取了海冰表面粗糙度高度，结合 7 个粗糙度参数分析评估了海冰厚度、海冰表面粗糙度和底层粗糙度三者之间的相关性，并给出了海冰表面和底层粗糙度的概率密度分布特征。主要得出以下 4 条结论；(1) 海冰厚度为 0~2.5 m 范围时，海冰表面粗糙度(主要指一阶粗糙度)与海冰厚度存在一定的相关性，随着海冰厚度的增加而增大。(2) 海冰底层粗糙度同样与厚度存在相关性，并且海冰表面和底层粗糙度与海冰厚度的相关系数比较接近。海冰表面和底层的三阶以及四阶粗糙度参数与海冰厚度相关性较弱，相关系数的绝对值均小于 0.2，这可能因统计参数的计算方法不同而异。另外，粗糙度参数的分布范围指出，海冰底层比海冰表面更为粗糙。(3) 拉布拉多海沿岸的海冰表面和底层粗糙度的概率密度函数为一维高斯函数，概率密度曲线和累积概率曲线显示，海冰表面和底层的均方根高度、高度偏度区别较大，主要表现在范围的不同。(4) 粗糙度参数之间的相关系数指出一阶粗糙度之间存在很强的相关性，相关系数 R 的最小值为 0.832，三阶统计量和四阶统计量中，斜率偏度与斜率峰度相关性显著，相关系数 R 的最小值为 0.953；另外，海冰表面和底层的粗糙度参数间的相关性有所差异，海冰

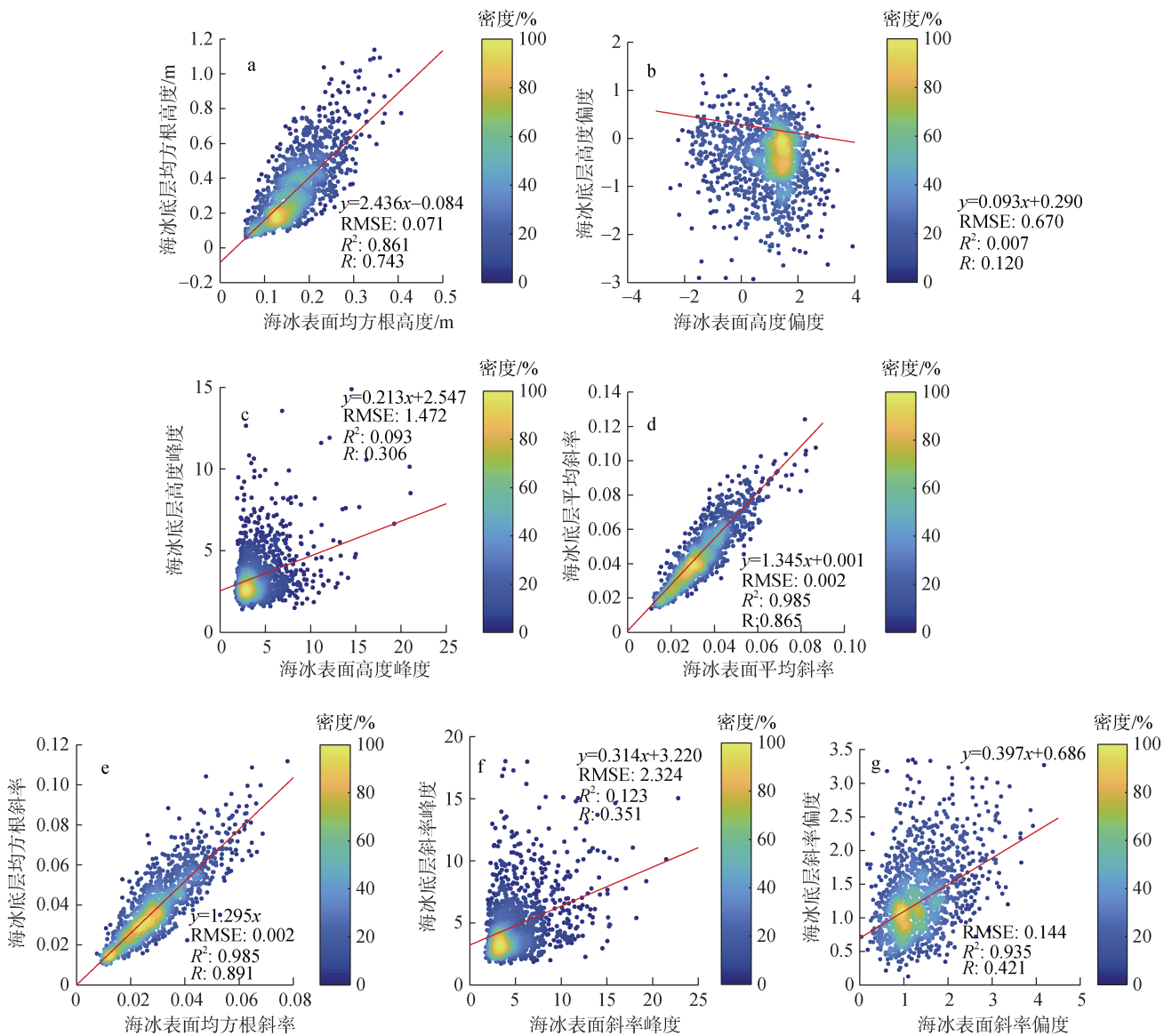


图 7 海冰表面和底层粗糙度的散点图以及线性回归模型及拟合效果

Fig. 7 Scatter plot and linear regression of the sea ice surface and bottom roughness with the fitting effect evaluated

表面高度峰度与斜率偏度、峰度之间相关性较强，但是海冰底层粗糙度并无此种情况。最后，海冰表面和底层粗糙度相关性分析显示，一阶粗糙度表征下的海冰表面与底层具有强相关性，相关系数大于 0.740。三阶粗糙度参数中斜率偏度相关性较低，为 0.421，其余的三阶、四阶参数相关系数均小于 0.4。此外，对海冰表面和底层的粗糙度拟合的线性回归模型进行了评估，平均斜率的拟合效果最好，均方根斜率次之，均方根高度的拟合效果优于斜率偏度。海冰表面与底层粗糙度的对比分析表明海冰表面与底层形态和相关性的研究，还需增加海冰厚度范围、引入不同

季节、不同区域以及不同年份的研究，这需要今后进一步研究。

致谢：我们非常感谢加拿大渔业和海洋部以及贝德福德海洋学研究所提供的机载电磁(HEM)数据和探地雷达(GPR)数据。

参考文献：

[1] ZHANG X, DIERKING W, ZHANG J, et al. Retrieval of the thickness of undeformed sea ice from simulated C-band compact polarimetric SAR images[J]. The Cryosphere Discussions, 2015, 9(5): 5445-5483.
 [2] MARCHENK A and MAKSHITAS A. A dynamic model

- of ice ridge buildup[J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2005, 41(3): 175-188.
- [3] RAMPAL P, WEISS J, MARSAN D. Positive trend in the mean speed and deformation rate of Arctic sea ice, 1979–2007[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2009, 114(C5). doi: 10.1029/2008JC005066.
- [4] ANDREAS E L, LANGE M A, ACKLEY S F, et al. Roughness of Weddell Sea ice and estimates of the air-ice drag coefficient[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1993, 98(C7): 12439-12452.
- [5] FISHER R, LYTLE V I. Atmospheric drag coefficients of Weddell Sea ice computed from roughness profiles[J]. *Annals of Glaciology*, 2017, 27: 455-460.
- [6] LU P, LI Z, CHENG B, et al. A parameterization of the ice-ocean drag coefficient[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 116(C7), doi: 10.1029/2010JC006878.
- [7] LUPKES C, GERDES R, HENDRICKS S, et al. Variability of Arctic sea-ice topography and its impact on the atmospheric surface drag[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2014, 119: 6743-6762.
- [8] PETTY A A, TSAMADOS M C, KURTZ N T, et al. Characterizing Arctic sea ice topography using high-resolution IceBridge data[J]. *The Cryosphere*, 2016, 10(3): 1161-1179.
- [9] PETERSON I K, PRINSENBERG S J, HOLLADAY J S. Observations of sea ice thickness, surface roughness and ice motion in Amundsen Gulf[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2008, 113(C6), doi: 10.1029/2007JC004456.
- [10] LANDY J C, PETTY A A, TSANADOS M, et al. Sea Ice Roughness Overlooked as a Key Source of Uncertainty in CryoSatIce Freeboard Retrievals[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(5), doi: 10.1029/2019JC015820.
- [11] SALDERN C V, HAAS C, DIERKING W. Parameterization of Arctic sea-ice surface roughness for application in ice type classification[J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 44(1): 224-230.
- [12] 王帮兵, 孙波, 田纲, 等. 利用三维 GPR 探测北极夏季海冰厚度及下表面形态特征分析[J]. *物探与化探*, 2007, 31(3): 189-192.
WANG Bangbing, SUN Bo, TIAN Gang, et al. The application of the 3D GPR method to measuring the depth of arctic summer sea ice and analyzing its under side morphology[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2007, 31(3): 189-192.
- [13] MASLOWSKI W and LIPSCOMB W H. High - resolution simulations of Arctic sea ice, 1979-1993[J]. *Polar Research*, 2003, 22(1), 67-74.
- [14] 孙波, 温家洪, 康建成, 等. 北冰洋海冰厚度穿透雷达探测与下表面形态特征分析[J]. *中国科学(D 辑)*, 2002(11): 951-958.
SUN Bo, WEN Jiahong, KANG Jiancang, et al. Penetrating radar detection of Arctic sea ice thickness and analysis of its lower surface morphology[J]. *SCIENCE IN CHINA(Series D)*, 2002(11): 951-958.
- [15] TIMCO G W and WEEKS W F. A review of the engineering properties of sea ice[J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2010, 60(2): 107-129.
- [16] HAN H, KIM J I, HYUN C U, et al. Surface roughness signatures of summer arctic snow-covered sea ice in X-band dual-polarimetric SAR[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5): 1-20.
- [17] LIU Chengyu, CHAO Jinlong, GU Wei, et al. On the surface roughness characteristics of the land fast sea-ice in the Bohai Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 7(33): 99-108.
- [18] BECKERS J F, RENNER A, SPREEN G, et al. Sea-ice surface roughness estimates from airborne laser scanner and laser altimeter observations in Fram Strait and north of Svalbard[J]. *Annals of Glaciology*, 2015, 56(69): 235-244.
- [19] GUPTA M, BARBER D G, SCHARIEN R K, et al. Detection and classification of surface roughness in an Arctic marginal sea ice zone[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(3): 599-609.
- [20] FORS A S, BREKKE C, GERLAND S, et al. Late summer Arctic Sea ice surface roughness signatures in C-Band SAR Data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2016, 9(3): 1199-1215.
- [21] CAFARELLA S M, SCHARIEN R, GELDSETZER T, et al. Estimation of Level and Deformed First-Year Sea Ice Surface Roughness in the Canadian Arctic Archipelago from C- and L-Band Synthetic Aperture Radar[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2019, 45(8): 1-19.
- [22] LUCIEER V, NAU A, FORREST A, et al. Fine-Scale Sea Ice structure characterized using underwater acoustic methods[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(10): 1-17.
- [23] DOBLE M J, SKOURUP H, WADHAMS P, et al. The relation between Arctic sea ice surface elevation and draft: A case study using coincident AUV sonar and airborne scanning laser[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 116(C11), doi: 10.1029/2011JC007076.
- [24] PRINSENBERG S J, PETERSON I K, HOLLADAY J S, et al. Labrador shelf pack ice and iceberg survey, March 2011[R]. *Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences*, 2012, 275: 1-44, <http://www.ocean-sci.net/>.
- [25] HAYKIN S S. Remote Sensing of Sea Ice and Ice-

bergs[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 1994.
[26] TIN T and JEFFRIES M O. Sea-ice thickness and rough-

ness in the Ross Sea, Antarctica[J]. *Annals of Glaciology*, 2001, 33(1): 187-193.

Analysis of sea ice surface and bottom morphological characteristics using the experimental data of Labrador Sea ice in early spring of 2011

LI Xing-xing^{1, 2, 3}, ZHANG Xi^{2, 3}, BAO Meng^{2, 3}, MENG Jun-min^{2, 3}, LIU Gen-wang^{2, 3}

(1. Shandong University of Science and Technology College of Geodesy and Geomatics, Qingdao 266590, China; 2. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 3. Technology Innovation Center for Ocean Telemetry, MNR, Qingdao 266061, China)

Received: Apr. 9, 2021

Key words: sea ice; roughness; correlation; surface morphology; bottom morphology

Abstract: The analysis of sea ice surface and bottom morphological characteristics plays an important role in sea ice classification, climate research, and sea ice thickness estimation. Currently, there are few studies on the morphology of sea ice bottom and a lack of correlation research on the surface and bottom morphology of sea ice. In response to this problem, this paper extracts the sea ice surface roughness profile and bottom profile data, using the snow surface roughness profile, sea ice thickness, and snow thickness data. The profile and data are obtained using electromagnetic sensors, laser altimeters, and ground-penetrating radar. Seven roughness parameters such as the root mean square height are used to analyze the roughness characteristics of the sea ice surface and sea bottom. The results show that among the seven roughness parameters, there is a strong correlation between the sea ice surface and bottom roughness described by the first-order roughness parameter and the sea ice thickness. All correlation coefficients are greater than 0.680. The third-order and fourth-order roughness parameters represent a weak correlation between the surface and bottom roughness of the sea ice and the sea ice thickness; the absolute value of the correlation coefficient is less than 0.2. Additionally, the roughness of the sea ice surface and the bottom layer described by the first-order roughness parameter has strong correlation characteristics; the correlation coefficient is greater than 0.740. This information plays an important role in estimating the bottom roughness and sea ice thickness by using sea ice surface roughness.

(本文编辑: 康亦兼)