

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0066

LI Wei, LU Peng, LI Zhijun, et al. Analysis of ice cracks morphology on lake surface of Lake Wuliangsu in the winter of 2017 - 2018[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3):919-926. [李伟, 卢鹏, 李志军, 等. 2017 - 2018年冬季乌梁素海湖冰表面裂缝形态分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3):919-926.]

## 2017 - 2018年冬季乌梁素海湖冰表面裂缝形态分析

李 伟<sup>1</sup>, 卢 鹏<sup>1</sup>, 李志军<sup>1</sup>, 庄 峰<sup>1</sup>, 卢志明<sup>1</sup>, 李国玉<sup>2</sup>

(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:** 在2017 - 2018年冬季使用无人机对乌梁素海湖冰的冰面裂缝进行了航拍, 采用改进的自适应阈值分割方法进行图像二值化处理, 提取了冰裂缝的密度和分形维数。分析结果显示: 在固定区域的冰裂缝分形维数在1.35 ~ 1.50间变化, 冰裂缝数量随时间增加, 其分形维数也随之线性增大; 在冰生长期间, 冰厚度与冰裂缝分形维数也呈现出明显的线性关系(相关系数 $R^2=0.75$ )。冰面不同区域的冰裂缝密度和分形维数在0.017 ~ 0.079、1.38 ~ 1.64间变化, 且两者之间存在显著的对数相关性(相关系数 $R^2>0.96$ ), 不同日期航拍数据拟合结果近似相等, 说明冰裂缝密度越大, 对应的分形维数越大。作为表征冰面形态特征的一种物理指标, 建立得到的冰裂缝分形维数与冰厚、裂缝密度的相关关系, 对未来利用冰面裂缝形态监测冰层的生消过程可提供科学的参考。

**关键词:** 乌梁素海; 湖冰; 冰裂缝; 图像处理; 分形维数

**中图分类号:** P332    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-0240(2020)03-0919-08

### 0 引言

冰面裂缝是天然冰生消过程中一种常见的表面形态, 除风、流及其他外部荷载作用之外, 冰裂缝大多是受温度变化导致的冰内热应力变化而产生的<sup>[1]</sup>。当气温降低, 冰体发生收缩, 由于冰温变化的不一致性, 冰表面一定深度范围内会产生裂缝。而随着气温升高, 冰裂缝会吸收部分冰体膨胀量; 当膨胀继续, 冰层就可能在裂缝处断裂, 结合外部强大的风、流作用力发生堆积或形成冰脊, 从而危及冰区和沿岸设施的安全<sup>[2]</sup>。因此, 冰裂缝的研究不仅对冰区设施的安全防护具有重要的工程意义, 还可用于指导冰面的生产作业活动。

国内外对不同类型冰裂缝的形态特征与形成机制已经进行了大量研究<sup>[3-5]</sup>。Weiss等<sup>[1]</sup>通过对不同空间尺度海冰断裂特性的分析, 发现了海冰

裂缝分布的自相似特性。Hibler<sup>[3]</sup>则关注于地球物理尺度的北极海冰的裂缝和冰间水道分布, 发展了各向同性以及各向异性的海冰断裂理论模型。Emet等<sup>[4]</sup>对南极冰盖上的冰裂缝进行了研究, 并开发了用于预测冰裂缝发生位置和发展过程的统计模型。Nomura等<sup>[5]</sup>研究了南极多年海冰上的裂缝分布, 并讨论了冰裂缝对冰内营养物质和微型藻类分布的影响。Lu等<sup>[6-7]</sup>则关注外力作用下冰裂缝的发展, 讨论了在冰与结构物作用的过程中冰面裂缝发生和发展的关键过程。在国内, Deng等<sup>[8]</sup>研究了黄河河冰的断裂特性, 发现了冰裂缝对河冰断裂韧性和拉伸强度的影响。Liu等<sup>[9]</sup>建立了新的冰断裂模型, 对东北水库冰的裂缝形成机理及其对冰力学性能的影响进行了深入研究。李志军等<sup>[10]</sup>、黄文峰等<sup>[11]</sup>分析了冰晶体间裂纹的出现和扩展过程, 从微观角度对冰裂缝的形成与发展做出了解释。茅

收稿日期: 2018-04-10; 修订日期: 2019-08-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579028; 51639003); 冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201604); 工信部高技术船舶项目(350631009)资助

作者简介: 李伟(1992 - ), 男, 山西吕梁人, 2016年在哈尔滨工程大学获学士学位, 现为大连理工大学在读硕士研究生, 从事海冰卫星遥感图像分析研究. E-mail: wli@mail.dlut.edu.cn

通信作者: 卢鹏, 教授, 从事海冰物理性质和物理过程研究. E-mail: lupeng@dlut.edu.cn.

泽育等<sup>[12]</sup>提出了预测冰裂缝位置的公式,对开河期冰盖横向裂缝的形成机理及其产生位置进行了分析。贾青<sup>[13]</sup>通过在红旗泡水库的冬季现场调查,对5 m×5 m范围内冰面裂缝的分布进行了研究。通过以上综述,可以发现前人研究多偏重于外力作用下冰裂缝的形成和发展机制,以及裂缝产生后对冰力学性能的影响,并未过多关注热膨胀应力引起的裂缝及其与冰生消过程的关系。从观测手段上看,前人的观测数据很难同时考虑覆盖范围与观测精度。利用卫星遥感获取的冰面图像,由于分辨率限制,很难观测到除冰脊以外的冰面裂缝;而数码相机所拍摄的视场范围有限,在裂缝的统计分析时会带来较大的偶然误差。

因此,本文采用无人机航拍技术对内蒙古乌梁素海冬季湖冰裂缝的分布进行定量研究。乌梁素海是国内同纬度地区最大的淡水湖泊,湖区地势平坦,气候典型,冰封期较长,是研究湖冰的合适地

域。利用携带自平衡云台装置的无人机可以获取理想的湖冰图像,在保证图像分辨率的同时可以覆盖更大的调查范围。同时,通过与冰面观测站冰生消过程数据的对比,可以探讨湖冰生消过程对冰面裂缝发展的影响。

## 1 湖冰原位观测

乌梁素海是中国八大淡水湖之一,地处内蒙古河套平原东端(40°57' N, 108°54' E),年平均气温5.8℃,年降水量215 mm。湖区南北长35~40 km,东西宽5~10 km,面积约293 km<sup>2</sup>,湖面高程1 018.5 m,最大水深约4 m,大部分水域水深在0.5~1.5 m<sup>[14]</sup>。由于地处高纬度地区,乌梁素海冬季可形成最厚60 cm的冰层。其冰期主要集中在12月中旬至次年3月中旬。本文选择较为开阔的冰面作为现场实验和航拍地点,位置见图1(a)中红色标记。

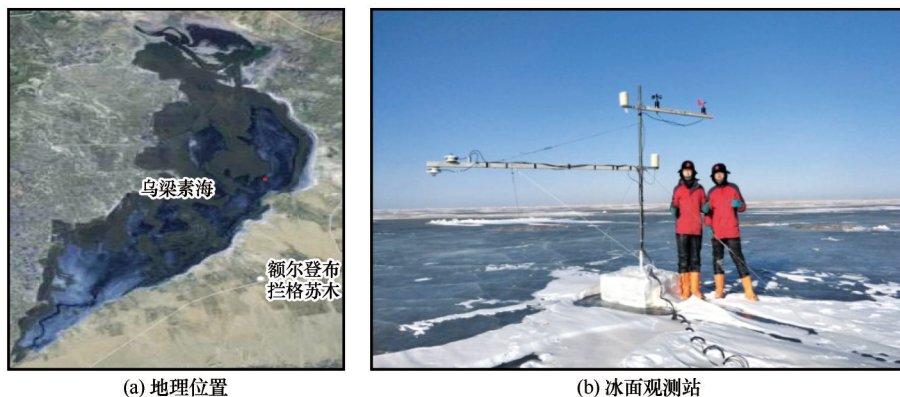


图1 乌梁素海地理位置(红色标记为实验地点)和冰面观测站

Fig. 1 The geographical location of Lake Wuliangsu (the red mark is the experimental site) (a) and the picture of the observation station on ice (b)

冰面航拍在2018年1月18日至2018年2月7日期间开展,其中1月27日与1月30日因设备问题造成当天航拍图像缺失。2月7日以后湖冰出现明显的表面融化,冰层强度下降,为保证人员与设备安全停止航拍。实验期间冰层厚度为20~40 cm,平均气温-12℃,风速2 m·s<sup>-1</sup>,晴朗天气占90%。昼夜温差可达10℃左右,保证了冰面裂缝的充分发展。无人机飞行高度100 m,摄像头以720 P分辨率实时观察,并拍摄2.7 K高清图像。对固定地点冰面观测站[图1(b)]冰裂缝的连续观测如图2所示,图像像素大小为1 700 P×1 700 P,实际覆盖范围为43 m×43 m。

同时,为对不同地点所获得的冰裂缝形态进行对比分析,在2018年1月5日和1月20日分别对湖区12个不同地点进行了拍摄。为避免图像中裸露的土地以及水草的影响,依据裂缝交叉点位置对图像进行了裁剪,选取2 048 P×2 048 P的子区域进行后续分析,对应实际覆盖范围52 m×52 m。

温度对湖冰的生消和裂缝发展有着最为直接的影响,冰面观测站[图1(b)]自动记录了冬季冰面实验期间的风速、风向、辐射、气温、冰温等气象水文要素<sup>[15]</sup>。在冰面观测站周边布置了四组热电阻丝进行冰厚监测,测量频率为2天1次。热电阻丝测量技术能够同时测量固定点冰层上、下表面的

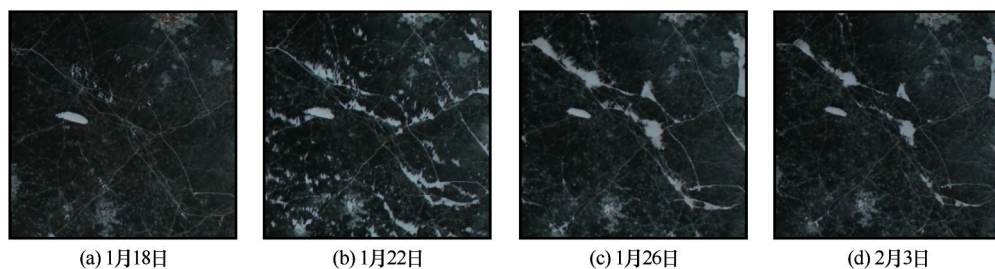


图2 2018年乌梁素海湖实验中对固定点冰裂缝的航拍图像示例及拍摄时间

Fig. 2 Examples of aerial photography of ice cracks at fixed location of Lake Wuliangsuhai in 2018, the shooting time are: January 18th (a), January 22nd (b), January 26th (c) and February 3rd (d)

生消过程, 多点测量也能避免了一定范围内冰层厚度生长的空间差异性的影响<sup>[16]</sup>。

## 2 数据处理与方法

### 2.1 冰裂缝的提取

部分湖冰图像存在雪层覆盖、水草集中裸露以及气泡集中的现象, 会对分析结果造成一定的影响。因此先将以上像素进行局部选定置零(即黑色覆盖), 然后将其转化为正方形冰裂缝灰度图像。使用改进的自适应阈值分割方法<sup>[17]</sup>, 即通过增强航拍图像的对比度, 均衡化灰度值以及估算阈值的最优范围来分割图像中的裂缝与裸冰。其基本思想是使用阈值 $t$ 将灰度为 $L$ 级的图像分为 $C_0$ 和 $C_1$ 两类, 由最大类间方差法得出 $C_0$ 和 $C_1$ 的类间方差, 再确定出阈值的最优值 $t^*$ 对应于类间最大方差<sup>[17]</sup>, 从而将图像分为目标(冰裂缝)和背景(裸冰)两个部分。

对于裂缝与周围冰面灰度值比较接近的图像, 可选取裂缝及其周围区域, 增强裂缝的对比度, 然后分析图像边缘的分形参数来确定裂缝位置<sup>[18]</sup>。此方法需要目标与周围图像具有良好的对比。也可以借助于基于分形理论的图像边缘检测方法<sup>[19]</sup>, 该方法迅速简单, 可操作性强, 具有有效的抗噪性能。之后再进行上述阈值处理步骤。

然后利用阈值 $t^*$ 将冰裂缝灰度图转换为对应的二值图(图3)。图像中冰裂缝处所对应的元素值为1, 裂缝以外的其他位置处所对应的元素值为0; 通过对二维矩阵的计算, 可以获取冰面裂缝的定量信息。卢鹏<sup>[20]</sup>和郑杨龙<sup>[21]</sup>在海冰遥感图像分析中, 将海冰所占的像素数量与目标图像的总像素数量的比值定义为海冰密集度。本文借用这种定义方法, 将裂缝密度定义为 $\rho = n/N$ , 其中 $n$ 为二值图像中数值为1的元素个数;  $N$ 为数组中元素的总个数。

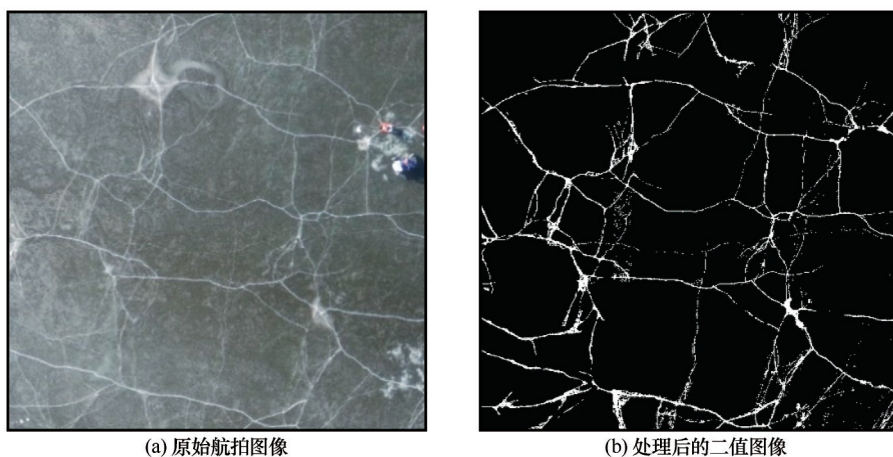


图3 像素大小为2 048 P×2 048 P的原始航拍图像(a)以及处理后的二值图像(b)

Fig. 3 The original image of 2 048 × 2 048 pixels (a) and the binary image after processing (b)

### 2.2 冰裂缝分形特征计算

在图3(b)中可以看出冰裂缝的形态不是呈规则的直线, 而是沿几条主裂缝延伸分叉相交, 再延

伸再分叉的状态分布, 次级裂缝中也有类似的表现。虽然不同的裂缝在几何形态上各不相同, 但在空间上存在着一定的相似性, 即冰裂缝分布的自相



似性。而分形维数是在分形几何的范畴来描述冰裂缝的曲折程度,分形维数随着折线曲折程度的增大而增大。计算分形维数所使用的盒计数法<sup>[22]</sup>是先用边长为 $r_1$ 的方形格子来覆盖目标图像(图4),并检索裂缝经过的网格数为 $N_1$ ;再用边长为 $r_2$ 的方形格子覆盖图像,统计裂缝经过的网格数为 $N_2$ ;依次循环,最后在双对数坐标下获取 $N_i$ 与 $r_i$ 的线性关系,其斜率绝对值即为分形维数 $D_f$ ,也可以表示为幂律: $N(r) \propto r^{-D_f}$ 。

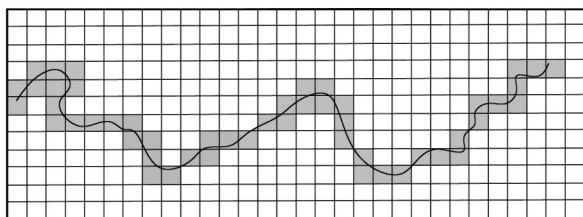


图4 曲线分形维数计算方法图示

Fig. 4 Sketch of box-counting method to determine fractal dimension

图5即为采用盒计数法对图3(b)冰裂缝图像的分析结果,对 $\ln r$ 与 $-\ln N$ 的散点图进行线性拟合,趋势线斜率即为该图形的分形维数 $D_f=1.5588$ 。采用相同方法对所有获取的图像进行处理,计算结果显示与幂律分布均吻合良好( $R^2>0.9$ ),说明了冰面裂缝分布的显著分形特性。

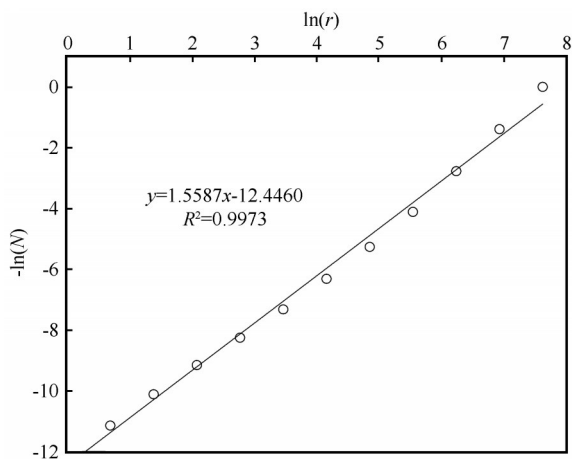


图5 裂缝经过的网格数 $N$ 与网格尺寸 $r$ 的关系

Fig. 5 The relationship between amounts of grids covered by ice cracks and grid sizes

### 2.3 冰厚观测

2018年1月中旬至2月中旬冰面观测站的冰厚测量结果如图6所示,图中还包含了采用冰钻打孔测量的冰厚对比数据。从1月中旬测量开始至2月

中旬测量结束,冰层厚度从不足30 cm稳定增长,2月初冰厚达到峰值后开始逐渐减小。4个电阻丝测点的初始冰厚非常接近,但演变过程和最大冰厚存在一定差异。1#、2#和4#测点最大冰厚为40 cm,而3#测点最大值达到44 cm,说明了冰厚的空间差异性。电阻丝测得的冰厚和钻孔测量数据吻合良好,偏差基本在 $\pm 2$  cm以内。在融化期由于气温较高,电阻丝在冰内的孔洞无法再次冻结,造成孔洞周边融化加速,此时电阻丝的冰厚度测量值不再可信,因此图6中冰厚到达峰值之后只有钻孔测量结果。

## 3 结果与分析

### 3.1 固定点冰裂缝的演变

利用图5所示的方法对2018年1月18日至2月7日期间所有的固定点航拍图像进行分析,得到了固定点冰裂缝的分形维数 $D_f$ 随时间的演变情况,如图7所示。可以看到该固定点冰裂缝的分形维数在1.35~1.50之间变化,且分形维数随时间呈现出很好的线性增长趋势。

图7中冰裂缝分形维数线性增加的时间区间与冰厚的增长区间(图6)基本吻合,因此可以据此建立固定点处冰厚变化与裂缝分形维数变化的关系,如图8所示,其中冰厚为4个测点电阻丝冰厚度测量值的均值。

从图8可以看到,随着冰层厚度的逐渐增长,冰裂缝分形维数也随之增加,呈现出明显的线性趋势( $R^2=0.75$ )。在冰消融过程中,冰层和大气、水体之间不断进行热量、动量、质量的交换,这些过程相互耦合,促进冰的厚度和质量发生变化。Korsnes等<sup>[23]</sup>指出冰的质量变化会引起垂直方向的位移,也会促使新的裂缝产生,裂缝中的水体在负气温时重新冻结;观测结果表明冰面裂缝存在不可逆性,而处于一种动态变化的状态。图8就反应了处于这种动态变化过程中冰厚和对应的裂缝分形维数之间的关系,但限于冰生长期。

### 3.2 冰裂缝分形维数与裂缝密度的相关性

除了固定点处冰裂缝的演变之外,不同点处冰裂缝的空间差异也值得关注。对2018年1月5日和1月20日所获得的不同位置冰裂缝图像进行分析,得到各处冰裂缝密度和分形维数的对应关系,如图9所示。对比图9(a)和9(b)发现不同日期航拍图像的冰裂缝分形维数 $D_f$ 分别在1.45~1.64和1.38~

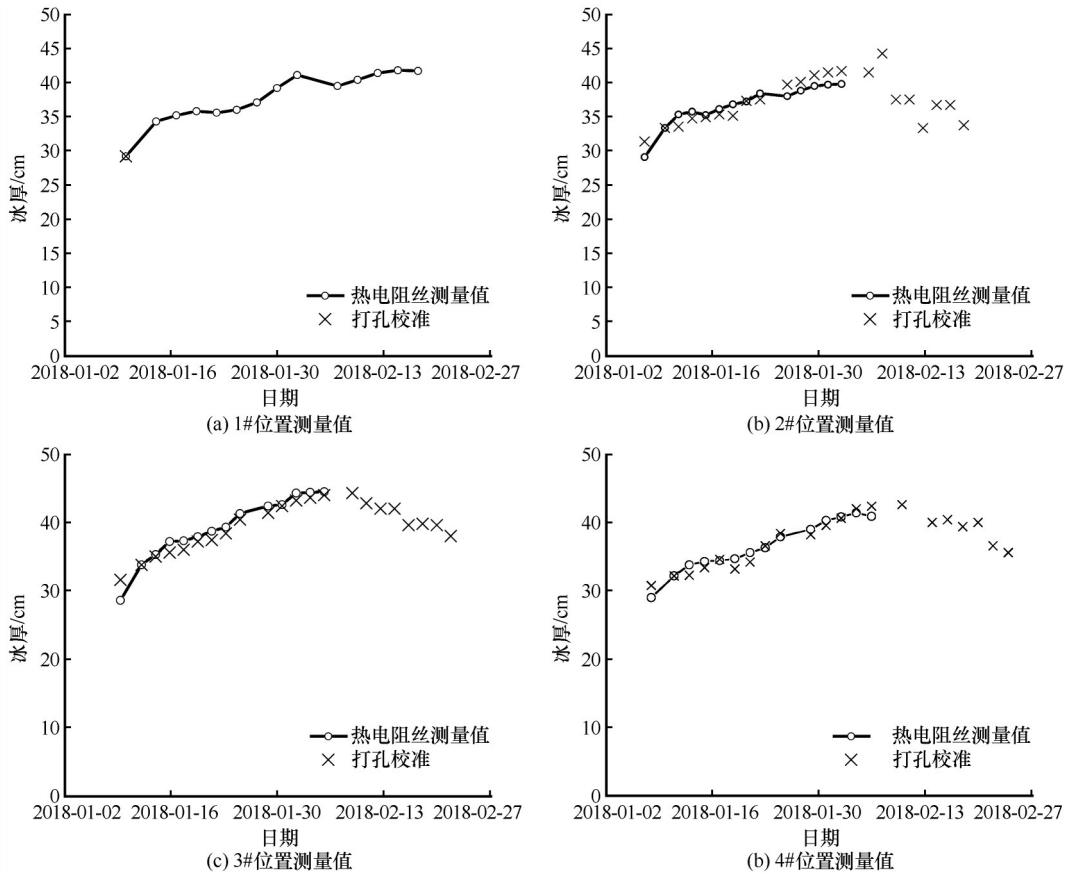


图6 冰面观测站周围四组热电阻丝测量冰厚: (a) - (d)分别为1# ~ 4#位置测量值

Fig. 6 Ice thickness measured by four thermal resistance wire near the ice station: (a) - (d) show the values of 1# - 4# site respectively

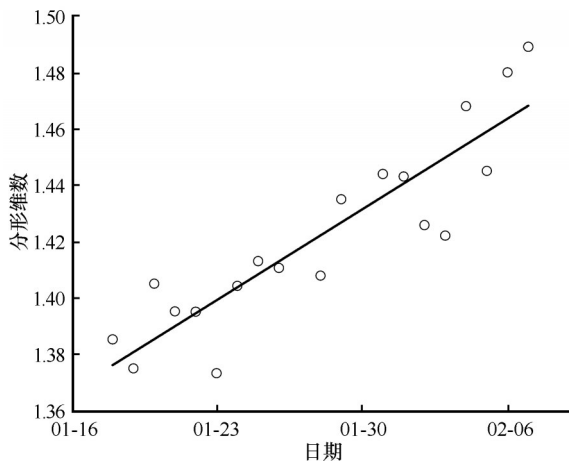


图7 固定点冰裂缝分形维数随时间的演变

Fig. 7 Variation in the fractal dimension of ice cracks at fixed point with time

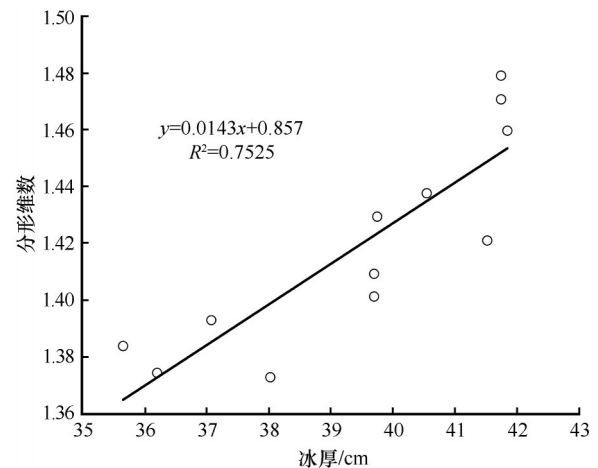


图8 固定点处冰裂缝分形维数与冰层厚度的关系

Fig. 8 The relationship between fractal dimensions of ice fracture and ice thicknesses at fixed point

1.48之间, 裂缝密度 $\rho$ 范围分别为0.025 ~ 0.079和0.017 ~ 0.029。曲线拟合结果显示 $D_f$ 与 $\rho$ 呈良好对数关系( $R^2>0.96$ ), 冰裂缝发育区的密度越大, 相应的分形维数也越大。当 $\rho$ 无限趋近于1时, 分形维数 $D_f$ 趋近于2, 即说明裂缝在目标图像中的占比无

限接近于1时, 其空间维度趋于2维。在两者的函数关系中, 方程常数项分别为2.0647和2.0626;  $\ln(\rho)$ 的系数项分别为0.1689和0.1669, 两类系数值接近。Weiss<sup>[24]</sup>通过大量数据证明了冰的断裂和破碎模式中的尺度不变性, 得到了冰裂缝分裂过程

的普遍规律,即可用统一的分形维数 $D_f$ 来描述不同空间尺度上冰的断裂情况。而本文中的裂缝密度 $\rho$ 是描述区域内不同尺度冰裂缝数量的另一重要指标,因此分形维数与裂缝密度之间存在关系。这是因为冰面裂缝时刻处于动态变化中<sup>[23]</sup>,但裂

缝发育越完善,不同尺度上裂缝的曲折程度也越强( $D_f$ 越大),同时裂缝覆盖的区域也越大( $\rho$ 越大)。图9中的拟合曲线即通过冰面不同位置的裂缝形态说明了裂缝密度 $\rho$ 与分形维数 $D_f$ 空间上的这种相关性。

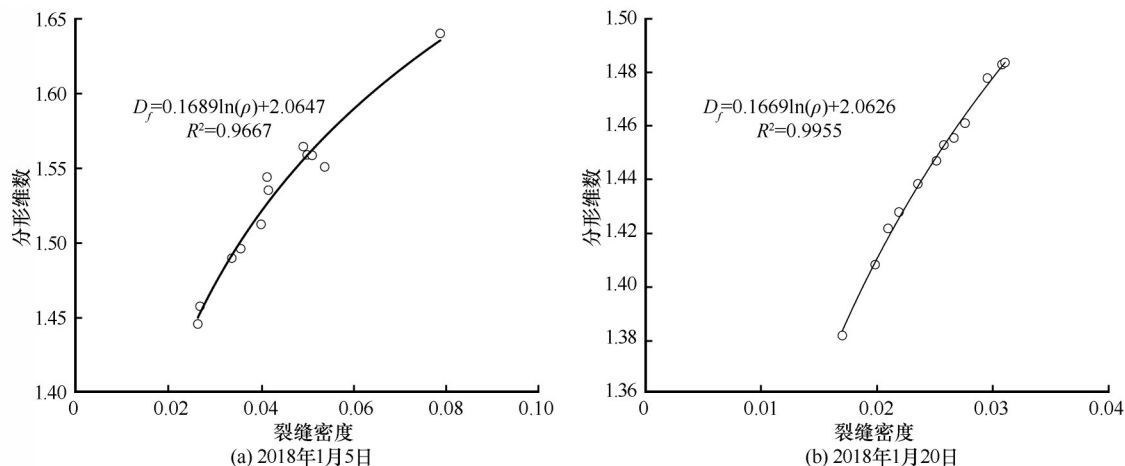


图9 不同位置处冰裂缝密度与分形维数的关系: 2018年1月5日(a); 2018年1月20日(b)

Fig. 9 The relationship between fracture densities and fractal dimensions at different locations on January 5th, 2018 (a) and January 20th, 2018 (a)

#### 4 结论

通过对乌梁素海湖冰的现场观测和无人机航拍图像分析得出以下结论:

(1) 2018年1月18日至2月7日冰面固定点处冰裂缝的分形维数 $D_f$ 在1.35~1.50范围变化,且分形维数随时间呈现出很好的线性增长趋势。随着时间的推移,裂缝数量增加,其分形维数也随之变大。

(2) 采用热电阻丝的冰厚观测值与钻孔冰厚数据吻合良好,表明了该方法可以较准确地连续记录冰厚的增长过程。冰厚与裂缝分形维数呈现正相关关系,并且厚冰对其裂缝分形维数的影响程度大于薄冰,即冰层厚度较大时,对应的分形维数波动较大。

(3) 不同地点冰面的裂缝形态分布具有明显的分形特征。2018年1月5日和1月20日航拍区域的冰面裂缝密度 $\rho$ 和分形维数 $D_f$ 分别在0.017~0.079、1.38~1.64范围内,且二者存在显著的对数相关关系,两日拟合对数曲线的常数项和对数项系数接近,说明冰裂缝密度越大,所对应的分形维数越大。

(4) 研究发现冰裂缝与冰厚度之间存在较强的

相关关系,说明冰裂缝的发展与冰的生消过程密切相关,但现有数据仍不足以澄清冰生消过程对裂缝发展的影响机理,未来可以继续积累数据以完善分析,同时还可以探索利用冰面裂缝的遥感监测来实现对冰生消过程的反演。

#### 参考文献(References):

- [1] Weiss J, Marsan D. Scale properties of sea ice deformation and fracturing [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2004, 5(7): 735 - 751.
- [2] Leppäranta M. Freezing of lakes and the evolution of their ice cover[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2015.
- [3] Hibler W D III. Sea ice fracturing on the large scale[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 68(17): 2013 - 2043.
- [4] Emetc V, Tregoning P, Morlighem M, et al. A statistical fracture model for Antarctic ice shelves and glaciers[J]. *The Cryosphere*, 12(10): 3187 - 3213.
- [5] Nomura D, Aoki S, Simizu D, et al. Influence of sea ice crack formation on the spatial distribution of nutrients and microalgae in flooded Antarctic multiyear ice[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(2): 939 - 951.
- [6] Lu W, Lubbad R, Løset S, et al. Fracture of an ice floe: Local out-of-plane flexural failures versus global in-plane splitting failure [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 123: 1 - 13.
- [7] Lu W, Lubbad R, Løset S. In-plane fracture of an ice floe: A theoretical study on the splitting failure mode[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 110: 77 - 101.
- [8] Deng Y, Li Z, Li Z, et al. The experiment of fracture mechanics characteristics of Yellow River ice[J]. *Cold Regions Sci-*

- ence and Technology, 2019, 168: 102896.
- [9] Liu X, Li B, Li Z, et al. A new fracture model for reservoir ice layers in the northeast cold region of China[J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 795–811.
- [10] Li Zhijun, Jia Qing, Huang Wenfeng, et al. Characteristics of ice crystals, air bubbles and densities of fresh ice in a reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(11): 1333–1338. [李志军, 贾青, 黄文峰, 等. 水库淡水冰的晶体和气泡及密度特征分析[J]. 水利学报, 2009, 40(11): 1333–1338.]
- [11] Huang Wenfeng, Li Zhijun, Han Hongwei, et al. Seasonal evolution of static freshwater lake ice microstructures and the effects of growth processes[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 699–707. [黄文峰, 李志军, 韩红卫, 等. 静水生长的淡水湖冰微结构的季节变化及其受生长过程的影响[J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 699–707.]
- [12] Mao Zeyu, Zhao Xuefeng, Hu Yingjun, et al. Mechanism of transverse-crack formation during river-ice breakup[J]. Advance in Water Science, 2009, 20(4): 572–577. [茅泽育, 赵雪峰, 胡应均, 等. 开河期冰盖横向冰缝形成机理[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 572–577.]
- [13] Jia Qing. Study on design ice parameters of slope protection on plain reservoir in cold regions[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. [贾青. 寒区平原水库护坡工程设计冰参数研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.]
- [14] Yang F, Li C, Leppäranta M, et al. Notable increases in nutrient concentrations in a shallow lake during seasonal ice growth[J]. Water Science and Technology, 2016, 74(12): 2773–2783.
- [15] Yan Lihui. Investigation on the ice growth, decay and physics in Yellow River Inner Mongolia Section and its one lake[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. [闫利辉. 黄河内蒙古段及其附属湖泊冰生消和冰物理调查[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.]
- [16] Li Zhijun, Han Ming, Qin Jianmin, et al. States and advances in monitor of ice thickness change[J]. Advance in Water Science, 2005, 16(5): 753–757. [李志军, 韩明, 秦建敏, 等. 冰厚变化的现场监测现状和研究进展[J]. 水科学进展, 2005, 16(5): 753–757.]
- [17] Zhang Q, Skjetne R. Sea ice image processing with MATLAB[M]. Florida: CRC Press, 2018.
- [18] Yu Hao, Yu Fujun, Liu Wei, et al. Information retrieval and preliminary study of reservoir ice-surface cracks from digital photos[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2010, 16(11): 1311–1313. [于浩, 于福军, 刘伟, 等. 红旗泡水库冰裂缝图像信息提取和初步分析[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(11): 1311–1313.]
- [19] Zhang Kunhua, Wang Jingru, Zhang Qiheng. Image edge detecting method based on fractal feature[J]. Opto-Electronic Engineering, 2001, 28(6): 52–55. [张坤华, 王敬儒, 张启衡. 基于分形特征的图像边缘检测方法[J]. 光电工程, 2001, 28(6): 52–55.]
- [20] Lu Peng. Study on sea ice geometric parameters and parameterization of drag coefficient based on image analysis[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. [卢鹏. 基于图像分析的海冰几何参数和拖曳系数参数化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.]
- [21] Zheng Yanglong, Lu Peng, Li Zhijun, et al. Comparisons of Arctic sea ice concentrations obtained by classification of Radarsat-2 Synthetic Aperture Radar imagery and retrievals from HY-2 Scanning Microwave Radiometer[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2016, 28(3): 413–423. [郑杨龙, 卢鹏, 李志军, 等. 基于Radarsat-2 SAR图像分类与HY-2微波辐射计反演获取北极海冰密集度的比较研究[J]. 极地研究, 2016, 28(3): 413–423.]
- [22] Ai T, Zhang R, Zhou H, et al. Box-counting methods to directly estimate the fractal dimension of a rock surface[J]. Applied Surface Science, 2014, 314: 610–621.
- [23] Korsnes R, Souza S R, Donangelo R, et al. Scaling in fracture and refreezing of sea ice[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2004, 331(1/2): 291–296.
- [24] Weiss J. Fracture and fragmentation of ice: a fractal analysis of scale invariance[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2001, 68(17): 1975–2012.

## Analysis of ice cracks morphology on lake surface of Lake Wuliangsuhai in the winter of 2017 – 2018

LI Wei<sup>1</sup>, LU Peng<sup>1</sup>, LI Zhijun<sup>1</sup>, ZHUANG Feng<sup>1</sup>, LU Zhiming<sup>1</sup>, LI Guoyu<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources,

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In the winter of 2017 and 2018, aerial photography of ice surface on Lake Wuliangsuhai was used to determine the density and fractal dimension of the cracks on ice surface, by using improved adaptive-thresholding and image segmentation. The results show that the fractal dimension of ice cracks at a fixed location changes within the range of 1.35 ~ 1.50, and both the amount and fractal dimension of the cracks increase with time. An obvious linear relationship is found between the fractal dimension and the ice thickness during the period of ice growth, with a correlation coefficient of  $R^2=0.75$ . For ice cracks at different locations of ice surface, the density varies within 0.017 ~ 0.079, and fractal dimension within 1.38 ~ 1.64. A significant logarithmic relationship is also found between the two parameters, with a correlation coefficient of  $R^2>0.96$ . Aerial photographs in different days give very similar results of curve fitting, revealing that a larger crack density attributes to a larger fractal dimension of the cracks. As a physical index of ice surface morphology, the relationship between fractal dimension of ice cracks and ice thickness, crack density is developed in this study, which provide a possibility to monitor the ice growth and decay through the evolution of cracks on ice surface.

**Key words:** Lake Wuliangsuhai; lake ice; ice cracks; image processing; fractal dimension

(责任编辑: 周成林; 编辑: 周成林)