

## 基于无人机影像识别冰封水库 CH<sub>4</sub> 冒泡分布热区\*

胡天超<sup>1</sup>, 金业<sup>2</sup>, 陈小强<sup>1,3\*\*</sup>, 金亢<sup>4</sup>, 孙源<sup>5</sup>, 李志军<sup>1,3</sup>, 许士国<sup>1</sup>

(1:大连理工大学, 建设工程学院, 大连 116024)

(2:长江水利委员会水文局, 武汉 430010)

(3:大连理工大学, 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024)

(4:辽宁省水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 沈阳 110006)

(5:宁夏回族自治区生态环境监测中心, 银川 750002)

**摘要:** 冒泡作为湖库等淡水生态系统中温室气体甲烷 (Methane: CH<sub>4</sub>) 排放的主要方式, 存在着高度时空异质性。水库库尾浅水区沉积物易产生 CH<sub>4</sub>, 并以冒泡的形式释放, 但是在开放水体中很难捕捉到 CH<sub>4</sub> 冒泡的排放热区。冰封水库在冰的生长过程中会冻结捕捉由沉积物产生并上浮富含 CH<sub>4</sub> 的气泡, 在冰面上形成一定规模的“冰封气泡”, 这使得基于冰封气泡特征识别 CH<sub>4</sub> 冒泡分布热区的规模、空间分布成为可能。本研究以我国东北地区大型水库-东风水库为调查对象, 基于冬季水库冰面的无人机影像与现场冰封气泡特征调查, 结合面向对象的分类方法构建了冰封气泡影像提取分割方法, 利用空间自相关分析探究冰封气泡空间分布模式, 识别冰封气泡聚集的热点区域。研究结果表明: (1) 东风水库库尾冰封气泡直径的范围为 1~10cm, 无人机 15m 飞行高度空间分辨率为 0.4cm, 能够满足识别冰封气泡的质量要求, 形态学顶帽变换方法能够有效改善光照不均的图像, 显著提高正射影像资料的合成质量; (2) 利用气泡、冰裂纹在长宽比、亮度、密度等特征值的差异性能够有效进行冰封气泡的有效提取分类, 受调查的 3 个气泡区分类总体提取精度均为 0.8 以上, 显示了较高的冰封气泡提取效果; (3) 3 个冰封气泡密集区域总气泡面积占库尾总面积的 0.24%, 3 个区域内部共 10 个调查样带的气泡面积占比分布范围为 2.6%~7.8%, 冰封气泡空间分布均呈现显著的聚集模式 (P<0.001), 被划分为冒泡分布热点的区域占库尾总面积的 0.9%, 说明在整个水库范围内, CH<sub>4</sub> 冒泡热区可能仅存在于有限的区域内。研究成果对于揭示湖库甲烷排放热区分布特征具有重要的指示意义。

**关键词:** 冰封水库; 无人机; CH<sub>4</sub> 冒泡; 热区; 面向对象分类;

### An effective method to identify the distribution of methane ebullition hotspots in ice-covered reservoir with image data analysis by UAV\*

Hu Tianchao<sup>1</sup>, Jin Ye<sup>2</sup>, Chen Xiaoqiang<sup>1,3\*\*</sup>, Jin Kang<sup>4</sup>, Sun Yuan<sup>5</sup>, Li Zhijun<sup>1,3</sup>, Xu Shiguo<sup>1</sup>

(1: School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, P. R. China)

(2: Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P. R. China)

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

(4: Liaoning water conservancy and hydropower survey and design research institute CO., LTD, Shenyang 110000, P. R. China)

(5: Ningxia Environment Monitoring Center, Yinchuan 750002, P. R. China)

**Abstract:** Ebullition is the primary pathway for methane (CH<sub>4</sub>) emissions from freshwater ecosystems such as lakes and reservoirs, while it always carried out with significant spatiotemporal variability. In shallow zones near reservoir inlets, CH<sub>4</sub> is often generated in the sediments and released as bubbles. However, how to capture the ebullition hotspots in open water bodies remains a challenge. During the ice-covered season, bubbles rich in CH<sub>4</sub> are trapped and preserved as "ice bubbles" within the growth of the ice. This natural phenomenon provides an opportunity to identify CH<sub>4</sub> ebullition hotspots based on the characteristics and spatial patterns of ice bubbles. This study focuses on the Dongfeng Reservoir, a large reservoir located in northeastern China. Using high-resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery of the winter ice surface and in-situ measurements of ice bubbles, we developed an object-based image analysis (OBIA) method for bubble segmentation and extraction. Spatial autocorrelation analysis was employed to investigate the distribution patterns of ice bubbles and to identify CH<sub>4</sub> ebullition hotspot areas. The important findings include: (1) The diameters of ice bubbles in Dongfeng Reservoir ranged from 1 to 10 cm. UAV imagery captured at 15 m altitude achieved a spatial resolution of 0.4 cm, sufficient for high-quality bubble identification. A morphological top-hat transformation effectively mitigated uneven illumination and enhanced the quality of digital orthophoto mosaics; (2) Differences in shape attributes, brightness, and density allowed for effective classification of bubbles and ice cracks, with the overall classification accuracy exceeding 0.8 across three investigated regions, demonstrating robust extraction performance; (3) The total bubble area in the three dense bubble regions accounted for 0.24% of the reservoir inlet area. Within these regions, the bubble area ratio along ten surveyed transects ranged from 2.6% to 7.8%. Spatial autocorrelation analysis revealed significant clustering of ice-encased bubbles (P < 0.001), with CH<sub>4</sub> ebullition hotspots occupying only 0.9% of the reservoir inlet area. The results indicate that CH<sub>4</sub> ebullition may be concentrated in the limited regions across the reservoir. The research findings are significant importance for indicating the distribution characteristics of methane emission hotspots in lakes and reservoirs.

**Keywords:** Ice-Covered Reservoir; Unmanned Aerial Vehicle; Methane Ebullition; Hotspots; Object-Based Images Classification;

水库具有防洪、发电、灌溉、航运以及供水等多种功能, 是人类调节利用水资源的重要措施。修建水

\* 2024-06-12 收稿; 2025-01-12 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (42077348, 42377412) 联合资助。

\*\* 通信作者; E-mail: [xqchen@dlut.edu.cn](mailto:xqchen@dlut.edu.cn)。

库的拦河筑坝行为导致大量土地被淹没,使得水库成为甲烷(Methane: CH<sub>4</sub>)等温室气体排放的重要来源<sup>[1-3]</sup>。研究表明湖泊、水库中 CH<sub>4</sub> 主要通过冒泡(Ebullition)向大气中释放<sup>[4-5]</sup>,其中水库 CH<sub>4</sub> 总排放量中冒泡排放占比可达 50%~88%<sup>[6-8]</sup>。由于 CH<sub>4</sub> 冒泡排在时间和空间上具有高度随机性,使得在开放水体中如何准确量化 CH<sub>4</sub> 冒泡传输十分困难。传统倒置漏斗法研究 CH<sub>4</sub> 冒泡通量时存在采样周期长、受瞬时风速和流速影响大、需要设置大量采样点等局限。另外,受倒置漏斗底面面积大小的限制,会过高或者过低地估算了水体 CH<sub>4</sub> 冒泡排放,很难准确把握较大区域水体 CH<sub>4</sub> 冒泡“热区”。冰封期会影响水库 CH<sub>4</sub> 释放的格局,全球具有冰封期的湖库面积占比约为 57%<sup>[9]</sup>,贡献了全球水库湖泊 CH<sub>4</sub> 约 50%的排放通量<sup>[10]</sup>。我国北方寒冷地区每年都有长达 3 个月以上的冰封期,随着冰的生长使得随机性较高的 CH<sub>4</sub> 冒泡释放过程被放缓,气泡会被短时期内被“封固”在冰体中,呈现出大小、形态各异的冰封气泡“斑块”<sup>[11]</sup>,这为识别水库 CH<sub>4</sub> 冒泡分布热区提供了良好的工作条件。另外,冰封期湖库累积的温室气体会极大地增加了春季冰融期温室气体的释放潜能,给全年湖库温室气体释放量的准确评估带来挑战。因此,通过冰封气泡特征来识别 CH<sub>4</sub> 冒泡分布热区是准确评估具有冰封特点湖库温室气体排放量的关键内容。

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)是目前获取高分辨率影像的常用手段,在低空遥感测量领域得到了广泛的应用<sup>[12]</sup>,这使得无人机摄影测量与面向对象的图像分析方法(Object-Based Image Analysis, OBIA)相结合进行冰封气泡的提取成为可能。现有相关研究多为北极圈内的冰封期热融湖,冰封水库具有与之类似的冰封特征以及 CH<sub>4</sub> 冒泡现象。Walter 等<sup>[13]</sup>采取现场调查的方式进行 CH<sub>4</sub> 排放通量的研究,根据直径将冰封气泡分为不同类别,结合各类型气泡对应区域的 CH<sub>4</sub> 通量实测值发现其与冰封气泡直径存在正相关关系,并根据该关系估算了全湖的 CH<sub>4</sub> 排放通量。Martin 等<sup>[14]</sup>在瑞典北部湖泊 CH<sub>4</sub> 冒泡释放的研究中评估了现场调查的可行性,结果表明调查样带覆盖面积至少需要达到湖泊面积的 1%,才能有效估算湖泊 CH<sub>4</sub> 冒泡通量。在此基础上,Lindgren 等<sup>[15-16]</sup>基于航空影像更为全面地进行了湖面冰封气泡(直径>9cm)提取,Engram 等<sup>[17]</sup>利用冰封气泡对合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的响应,与 CH<sub>4</sub> 气泡实测通量相结合,成功绘制了阿拉斯加 5000 余个湖泊的 CH<sub>4</sub> 冒泡释放通量图。石晓光等<sup>[18]</sup>发现气泡使得白冰在 800/1030nm、黑冰在 400nm 处的吸收面积和吸收深度减小,气泡大小和疏密程度均会影响湖冰的反射率。

由于气候条件及生化环境的差异,冰封水库气泡来源与形态特征又有别于热融湖。Walter 等<sup>[19]</sup>认为热融湖 CH<sub>4</sub> 冒泡排放有生态系统与沉积盆地中深层沉积物两个来源,而水库 CH<sub>4</sub> 冒泡排放主要归因于前者,在 CH<sub>4</sub> 释放强度上也低于后者,这就导致水库冰封气泡(1~10cm)在大小上与热融湖(5cm~1m)存在较大差异。同时受限于 SAR 的空间分辨率(10~100m),水库冰封气泡的提取难以借助 SAR 进行,而无人机影像分辨率可达毫米级(<1 cm),为水库冰封气泡的精细化研究提供了理想的数据支持。此外,在上述研究中,仅根据气泡形态进行分类,未进行更为细致的气泡图像分割,也未对气泡分布的空间分布特征进行深入讨论。为建立气泡密度、形态与 CH<sub>4</sub> 冒泡排放通量间定量关系,考虑 CH<sub>4</sub> 冒泡排放的“热点”与“冷点”,以更为准确估算 CH<sub>4</sub> 冒泡排放通量,首要任务是准确地进行气泡提取。本文以我国东北地区具有长冰封期特点的大 II 型水库—东风水库为研究对象,利用无人机采集高分辨率冰面可见光影像,结合面向对象的分类方法,在单个气泡尺度上进行更为精细的冰封气泡识别,验证气泡提取精度,探讨分类指标的选取与气泡形态对识别效果的影响,并借助空间自相关分析(Moran's I)探究冰封气泡空间分布的主导模式,为更精确地估算水库 CH<sub>4</sub> 冒泡排放建立良好前提。

## 1 材料与方 法

### 1.1. 研究区概况

东风水库(39° 42' 17.70~39° 46' 6.05" N, 121° 55' 22.28" ~122° 0' 7.54" E)位于辽东半岛南部,坐落于大连市第二大河-复州河干流的中上游,是一座以防洪、灌溉、供水、发电、养殖等综合利用的大 II 型水库。水库于 1994 年 10 月落闸蓄水,1995 年 6 月竣工验收,坝址以上控制流域面积 663km<sup>2</sup>,总库容 1.42 亿 m<sup>3</sup>,兴利库容 0.937 亿 m<sup>3</sup>。东风水库主要入库河流为复州河干流,入库前的复州河干流汇入了支流回头河,回头河流经轴承工业发达聚集的瓦房店市区,来自瓦房店市区的工业废水、生活污水以及污水处理厂尾水对回头河水质影响较大,进而影响了汇流后的库区水质,存在较强的富营养化风险<sup>[20]</sup>。东风水库流域年平均气温为 8.3℃~10.3℃,全年 0℃以上的持续日数约 250 天。冬季水库有约长达 3 个月以上的冰封期,冰盖通常在 12 月下旬开始形成,最大冰盖厚度可达 30~40cm,到次年 3 月初开始融化(详见附图 1)。有研究表明水库库尾浅水区是 CH<sub>4</sub> 冒泡的热点<sup>[21]</sup>,前期研究也印证了东风水库库尾浅水区是 CH<sub>4</sub> 冒泡的高排放区域<sup>[5]</sup>。在 2021 年和 2022 年两年冬季的现场勘察中发现库尾分布有形态各异的冰封气泡,而在坝前深水区等其它区域未发现冰封气泡。此外,在水库库尾以外区域数天的倒置漏斗布设中也未收集到气体。因此,本研究将东风水库库尾区作为冰封气泡研究的重点区域(如图 1)。

## 1.2 无人机冰封气泡影像采集

本文数据采集时间为 2022 年 12 月下旬至 2023 年 1 月上旬的冬季冰封期（详见附表 1），此时为水库库尾区冰生长的盛冰期，冰盖厚度大于 30cm，冰面作业比较安全，而且冰封气泡发育趋于稳定。本次研究无人机平台为 DJI Phantom 4 Pro（大疆，中国），搭载有 1 英寸、2000 万像素的可见光传感器，使用最高速 1/2000s 的机械快门消除在拍摄运动物体时产生的拖影影响。航线规划用 DJI GS Pro（大疆，中国）完成，图像采集模式均为正摄影，两张图片拍摄间隔时间为 2s。由于水库大部分冰封气泡目标较小（目视直径通常小于 10cm），对全库尾进行低空航拍所需时间较长。因此，首先对水库整个库尾约 1km<sup>2</sup> 范围内的冰面进行飞行高度为 200m 的图像采集（分辨率 2.7cm），经过图像镶嵌，获取数个冰封气泡密集区域的位置、大小、规模等信息，并结合现场踏勘划分气泡密集区域。随后在冰封气泡密集区域逐个进行飞行高度为 15m 的低空精细摄影（分辨率 0.4cm），以获取清晰的冰封气泡无人机影像。无人机影像的范围包含全库尾及 3 个气泡密集区，气泡密集区分别标记为 R1、R2 和 R3（如图 1），每个气泡密集区又划分为 2-4 个调查样带，经过挑选，剔除运动模糊、重复等照片得到可用影像约 4000 张。

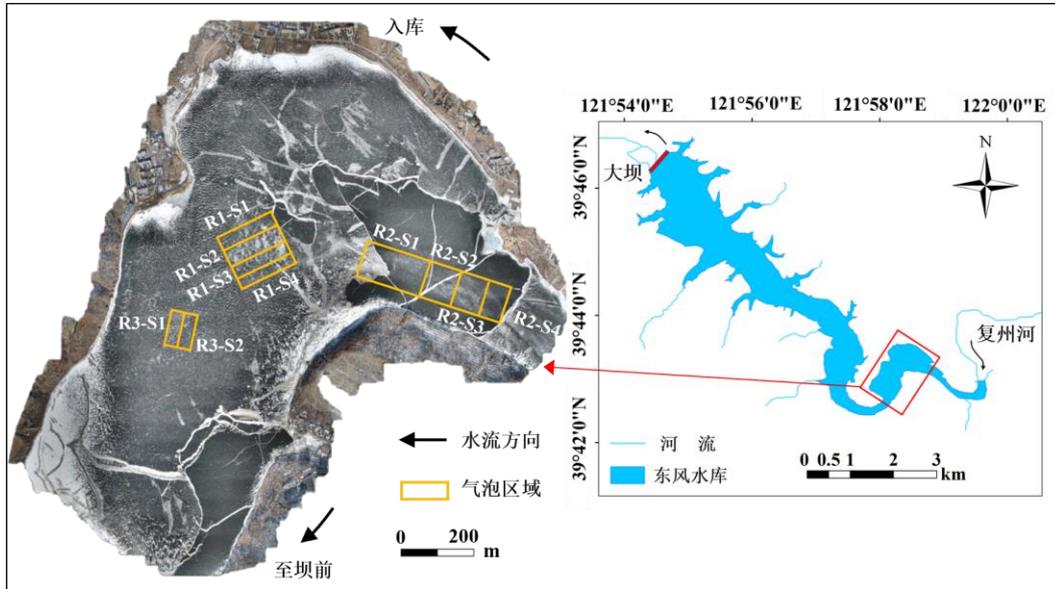


图 1 东风水库概览及库尾冰封气泡调查位置

Fig. 1 Overview of Dongfeng Reservoir and the investigation sites at ice-covered reservoir inlet

## 1.3 冰封气泡图像识别与统计

本研究首先对无人机影像采用形态学顶帽变换进行亮度均衡化处理<sup>[22]</sup>，再进行数值正射影像（Digital Orthophoto Map, DOM）的镶嵌合成，然后采取面向对象的分类方法进行气泡的提取，最后根据气泡提取结果借助 Moran's I 进行气泡空间分布特征研究，Moran's I 取值在 -1 到 1 之间，大于 0 时表明相似值在空间上趋于聚集，小于 0 时表明相异值在空间上趋于聚集（详见附图 2-5），具体冰封气泡图像识别与分类量化技术路线如图 2 所示。

## 1.4 冰封气泡形态观测

为实际观测冰封气泡的水平、垂向两个方向上的形态，首先，使用 1m×1m 正方形样方作为参照，同时以平行于冰面、距冰面以上约 1.5m 的位置使用手机拍摄气泡平面图像记录坐标信息，在完成冰面照片的拍摄后在样方木框的中央画有待取冰样轮廓，然后使用链锯取出长宽高约 30cm×30cm×冰厚的冰坯，测量冰厚并标记出正南方向随后使用保温棉包裹并标记，完成取样后立刻低温运回大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室，储存在 -30℃ 的环境中待检测。

## 1.5 冰封气泡中气体采集及 CH<sub>4</sub> 浓度分析

采集冰封气泡中气体时，先利用冰钻在冰封气泡处钻入一定深度，接近但不破坏冰封气泡，随后在冰洞中灌满水，将气泡用锥子戳破后马上将满水的顶空瓶倒置在冰洞中，利用排水法收集气体，完成收集后迅速用带铝盖的橡胶塞密封。收集的气体通过气相色谱仪（安捷伦 7890A，美国）测定 CH<sub>4</sub> 浓度，CH<sub>4</sub> 检测器为离子化火焰检测器（Flame ionization detector: FID），工作温度 200℃，测定过程中采用标准气体（中国计量科学研究院，北京）进行外标法校正。

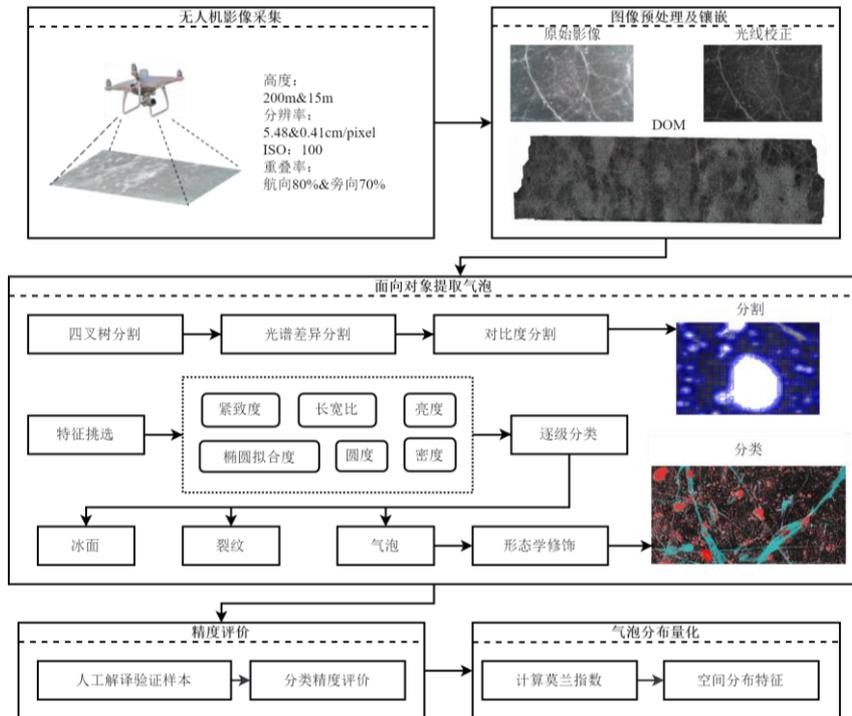


图2 基于无人机影像识别冰封气泡及分类量化流程

Fig.2 the framework for classifying ice-trapped bubble with image data analysis by UAV

## 2 结果

### 2.1 图像预处理及冰封气泡信息提取

基于无人机拍摄的原始图像中存在结冰裂纹，这会严重影响冰封气泡的提取效果。本研究采取形态学方法对无人机影像进行亮度均衡化处理，从灰度三维图中可以看出原始图像（图 3-a）中有着更高的亮度值（最高处约 250），同时图中边界区域参差不齐，亮度更高的裂纹在三维灰度图像中反映为明显的条状隆起，经过形态学运算后，得到去除了结冰裂缝的背景图像，但其左侧边缘亮度相比其他区域较大，这是由于拍摄时光照不均匀所致，由原始图像减去背景图像得出的校正后图像可以看出图像整体亮度降低（最高处约为 170），同时一些高亮的裂纹也被有效抑制（如图 3-b）。对比校正前后合成的正射影像，校正前图像一些区域由于过高的亮度导致图像纹理缺失，使得正射影像内部中存在没有图像信息的“空洞”，通过顶帽变化校正后图像亮度较为均一，在保留冰封气泡信息的同时图像过曝现象也得到有效抑制，能够得到完整的正射影像（如图 3-c）。

如何实现冰面与气泡图像信息有效分割是获取冰封气泡信息的关键。冰封气泡作为本研究主要的关注对象，图 4（a）和（b）分别呈现了原始图像与最终分割后的效果，由图可见分割生成的对象轮廓与大部分气泡的实际轮廓较为贴合，典型的圆形气泡在纹理、分布格局、光谱特性等方面与冰面差异较为显著，分割效果较为理想，基本保留了冰封气泡的空间分布特征。得益于无人机航测的极高分辨率，图像中直径 2cm 左右的气泡也清晰可见，并被较好的分割。冰封气泡外冰面上存在一些白冰斑块、裂纹等有着较高的亮度值，与气泡一同被区别于冰面，这是冰封气泡分割的误差来源之一。

R1-S1 样带原始图像（图 5-a）和最终冰封气泡分类结果（图 5-b）如图 5 所示。从结果可见，面向对象的提取方法能较好完成大尺度范围内冰封气泡的提取，漏分现象较少。由于微小气泡（直径 1~2cm）数量众多，且亮度较低，为尽可能将其纳入分类，建立相对宽松的分类规则集，这就导致一些的亮度较高，几何特征接近圆形的白冰斑块被错分为气泡，但由于对其在面积大小上做出限制，这类错分在面积上的总体占比并不大。直径较大的气泡（直径 2~10cm），通常是在冰面阻挡下，由沉积物释放的一连串小气泡融合而成，这类气泡形状上多为较规则的近圆形状，同时也有着较高的亮度，因此其分类结果与实际吻合度较高。从图像分类的结果来看，大多数冰封气泡成团出现，冰封气泡空间密度分布上呈现较大差异性，基于面向对象的分割方法可以保留大部分差异性特征值。

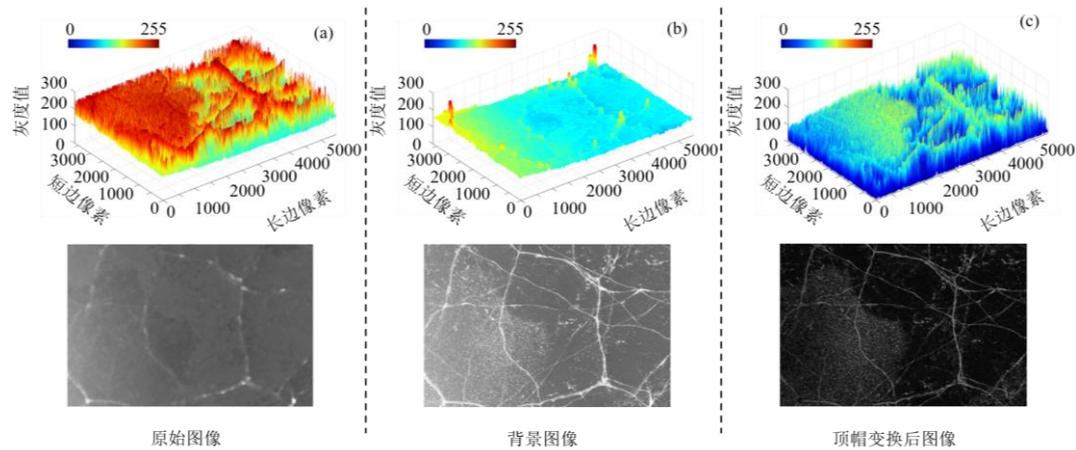


图 3 图像顶帽变换过程

Fig.3 the process of image top-hat transform method

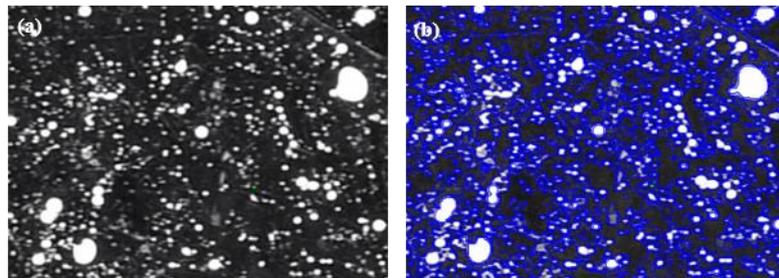


图 4 冰封气泡的原始图像(a)及基于面向对象的最终分割结果 (b)

Fig.4 Original image (a) and final segmentation image (b) of ice-trapped bubbles

## 2.2 冰封气泡提取精度评价

冰封气泡的提取精度评价结果如表 1 所示，三个主要气泡区域（R1、R2 和 R3）的气泡分类总体精度均在 0.80 以上，可满足冰封气泡空间分布特征的识别与解析。冰封气泡提取总体精度的大小顺序为  $R1 > R3 > R2$ ，R2 区域的冰封气泡提取精度较低。结合冰封气泡现场调查来看，造成这一差异的主要原因是 R2 区域大多数气泡小而致密，这就导致冰封气泡与冰体之间的颜色差异性不够明显，因此存在较多错分的情况发生。此外，R2 区域气泡重叠现象更多，这就导致在相同分辨率下，单个气泡目标不容易被识别到，也增加了与常呈现白色的白冰斑块混淆的可能性，从而导致产生一定的提取误差。R1 和 R3 区域内冰封气泡大且多为接近圆形，有着更高的亮度与更明晰的提取边缘，同时气泡重叠现象也要少于 R2 区域。因此，R1 和 R3 区域的冰封气泡更容易被分割分类，本方法对大部分的冰封气泡都有着较好的提取效果。

表 1 冰封气泡提取精度评价表

Tab.1 Accuracy assessment for ice-trapped bubble classification

区域	类别	冰面 样本	气泡 样本	裂纹 样本	分类 合计	生产 精度	用户 精度	总体 精度
R1	冰面	85	5	11	101	0.84	0.85	-
	气泡	7	87	5	99	0.88	0.88	0.87
	裂纹	9	8	83	100	0.83	0.84	-
R2	冰面	82	7	11	100	0.82	0.82	-
	气泡	2	93	7	102	0.89	0.89	0.81
	裂纹	3	6	85	94	0.87	0.82	-
R3	冰面	87	6	7	100	0.87	0.87	-
	气泡	8	85	7	100	0.85	0.85	0.85
	裂纹	5	9	86	100	0.86	0.86	-
合计		300	300	300				

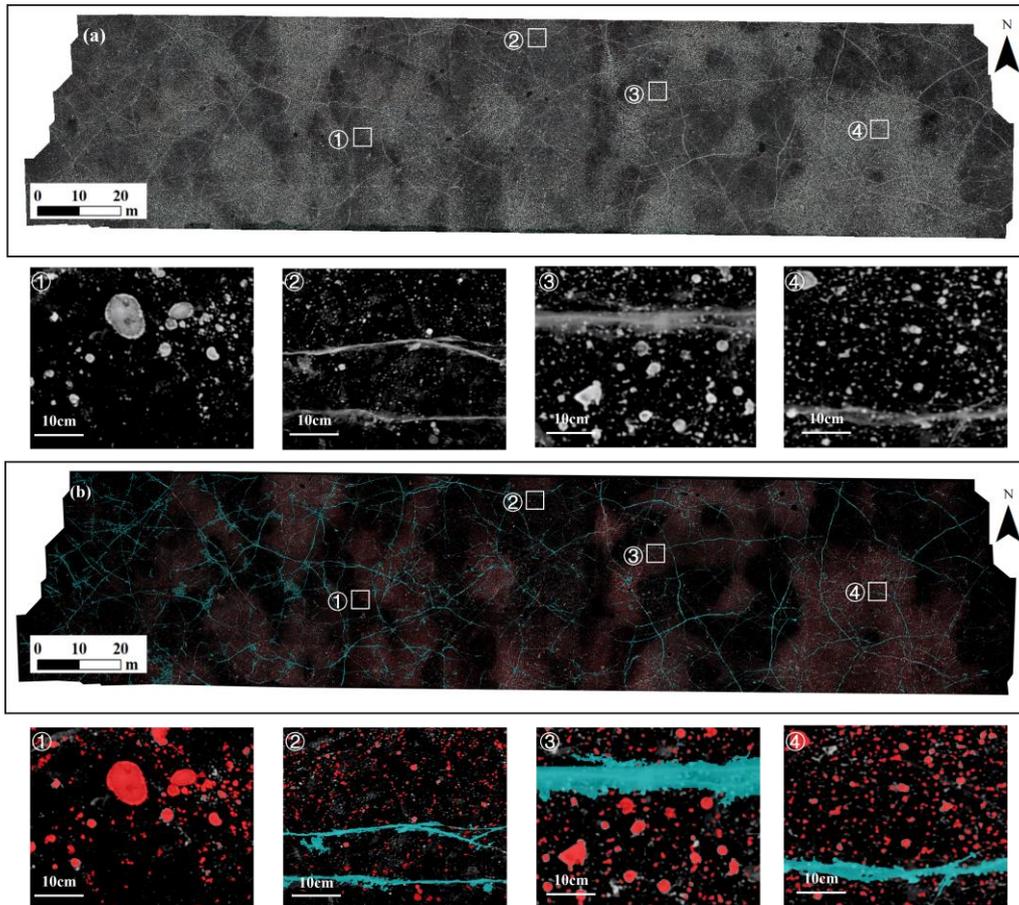


图 5 R1-S1 样带不同区域图像分类结果 (a)原始图像; (b)最终分割结果  
Fig.5 Image classification results of R1-S1 (a) Original image; (b) Final classification image

### 2.3 冰封气泡空间分布特征

为更直观展示水库冰封气泡的空间分布特征，以 R1-S1 为例，将各冰封气泡提取结果映射到  $1\text{m} \times 1\text{m}$  空间网格中（如图 6-a）。R1-S1 样带在  $1\text{m}^2$  单位面积内冰封气泡的面积占比均在 20% 以下，R1-S1 中样带气泡总面积占样带总面积的比例较低，为 4.6%，冰封气泡密度的空间分布上呈现较为明显的点状分布特征。由于实际冰面灰尘，白斑块等会对气泡提取产生干扰，因此，将提取结果中气泡占比 1% 以下的网格视为“无气泡”区域，1% 及以上视为“有气泡区域”，“有气泡区域”占样带总面积为 76.1%。从样带内不同气泡面积密度单位网格的分布数量来看，气泡面积占比为 1~2% 的网格数量达到 907 个，占 R1-S1 样带总面积的 14.6%；在有气泡区域中，气泡面积占比介于 1~5% 的网格数量占比达到“有气泡区域”的 50%，占 R1-S1 样带总面积的 38.2%；气泡面积占比 15% 及以上网格数量为 116 个，占 R1-S1 样带总面积的 1.9%。这表明多数水库冰封气泡在分布上以稀疏气泡为主，簇拥成团的大气泡面积占比较小。

基于 Queen 法计算 R1-S1 样带  $1\text{m}^2$  内气泡面积占比的全局 Moran's I 为 0.89，采用条件置换法（999 个）全局 Moran's I 指数进行显著性检验<sup>[23]</sup>，结果表明单位面积内冰封气泡面积占比在冰面上的分布具有非常显著的正空间集聚特征（ $z=98.6$ ,  $p<0.001$ ）。采用单变量局部 Moran's I 指数绘制显著空间聚类 and 空间异常值（如图 6-b），“高-高”表示高气泡面积占比区域相邻区域（8 连通）也是高气泡面积占比区域，是气泡聚集的“热点”；“低-低”则表示低气泡面积占比区域相邻区域也是低气泡面积占比区域，是气泡聚集的“冷点”。“高-低”高气泡面积占比区域相邻区域是低气泡面积占比区域，而“低-高”表示低气泡面积占比区域相邻区域是高气泡面积占比区域。结果显示，R1-S1 样带中 25.75% 的区域被归类为“热点”，54.7% 的区域被归类为气泡释放的“冷点”，这说明  $\text{CH}_4$  的冒泡释放主要在较小范围内发生，在空间上具有较为明显的集中释放特征，也表明在作为  $\text{CH}_4$  冒泡释放热点区域的水库库尾，其内部存在集中程度更高的热点。在“高-高”聚类的边界以及其内部存在着低-高空间异常值，这表明范围较大的冰封气泡

簇群（直径>30m）可能是由多个相邻的气泡释放点源融合而来，“低-低”空间聚类中存在着“高-低”空间异常值也反映着单个冒泡点源可能的规模。

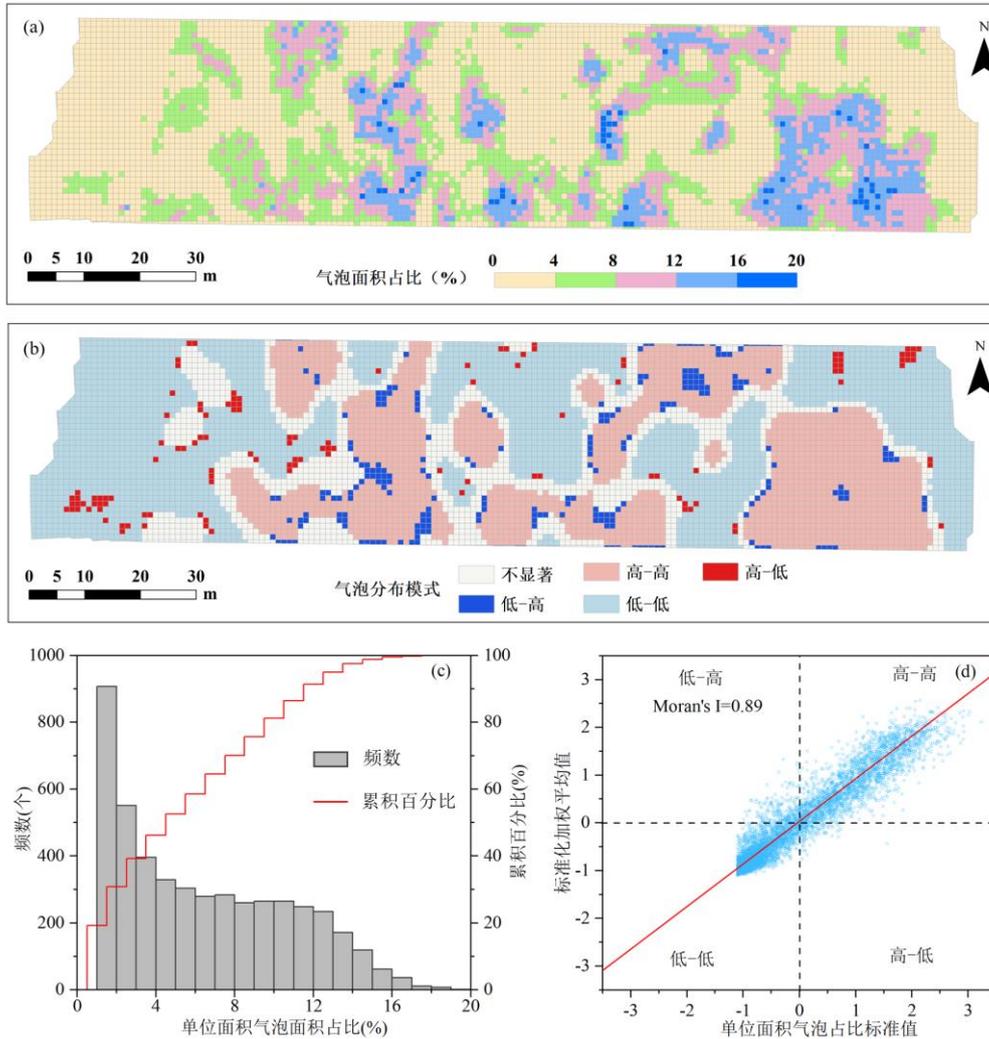


图 6 (a) 冰封气泡分布图 (b) 局部 Moran's I 空间分布图 (c) 单位面积冰封气泡占比分布直方图 (d) 局部 Moran's I 散点图

Fig. 6 (a) Distribution map of ice-trapped bubbles; (b) Local Moran's I map (c) Histogram of ice-trapped bubbles proportion per Unit Area; (d) Scatter plot of local Moran's I

水库冰封气泡总面积占比占个样带总面积的范围为 2.6~7.8%（详见表 2），不同冰封气泡样带之间气泡总占比存在一定差异性。受调查水库库尾主要气泡分布区域以 R1 与 R2 为主，二者面积均在 20000m<sup>2</sup> 以上，R3 区域较小，面积仅约为 100m<sup>2</sup>。上述三个区域中气泡密度也存在明显差异，气泡密度的大小顺序为 R2>R1>R3，其中 R2 区域气泡密度最高，区域内气泡面积占 R2 总面积的 5.2%，R1 与 R3 区域气泡占比接近，分别为 3.5% 与 2.9%。R2 区域内部不同样带的气泡面积占比差异也较大，最高的区域为 R2-S2，气泡占比为 7.8%，最低的为 R2-S1，气泡占比为 2.8%。造成该差异的原因可能是 R2-S1 样带位置位于区域边缘，为气泡区域与无气泡区域过渡部分，其余 3 条样带中气泡位置分布较为集中。计算气泡面积的莫兰指数发现，10 条样带全局 Moran's I 均大于 0.79，说明气泡在冰面上的分布呈现极显著的正空间集聚特征 ( $z > 100$ ,  $P < 0.001$ )。受调查水库库尾总面积约为  $1.2 \times 10^6 \text{m}^2$ ，无人机拍摄的实地面积为 50870m<sup>2</sup>，约占整个库尾总面积的 4.3%，冰封气泡面积仅占总库尾面积的 0.24%，如果将“高-高”聚类区域作为 CH<sub>4</sub> 冒泡释放的热点区域，库尾区域有 0.9% 的区域被划分为 CH<sub>4</sub> 冒泡释放的热点，在全水库尺度上热区占比

会更小，但这一部分区域对水库  $\text{CH}_4$  释放的贡献不可忽视。

### 3 讨论

#### 3.1 冰封气泡形态特征

本研究对象东风水库冬季冰封气泡现场可观测到的气泡形态主要分为以下 4 种（如图 7 所示）：（a）线粒状气泡、（b）念珠状气泡、（c）圆碟状气泡和（d）多种形态混合型气泡。结合气泡的平面观测结果来看，表面几乎没有肉眼可见气泡的冰体中气泡主要为线粒状，其长径比较大，有明显拖尾；表面气泡较小但较为致密的冰中，气泡多为念珠状；表面气泡较为稀疏但单个气泡直径较大的冰中，气泡主要为碟状；表面气泡直径差异较大且气泡密集的冰中，气泡主要为多种形态混合型。冰内气泡的来源有多种，但主要包含以下三种<sup>[24]</sup>：（1）在环境温度迅速下降、冰盖尚未完全形成的结冰初期，水中的空气被快速冻结在冰表层，形成微小的气泡，这种冰封气泡广泛存在于表层冰体中；（2）在冰盖形成后，水流的扰动会导致水中的空气包裹体未能迅速释放，最终被冻结在冰内，冰封气泡大部分存在于中上层冰体中；（3）冰盖开始形成后，沉积物产生的气体被阻挡并被持续向下生长的冰冻结，冰封气泡大部分存在于中下层冰体中。

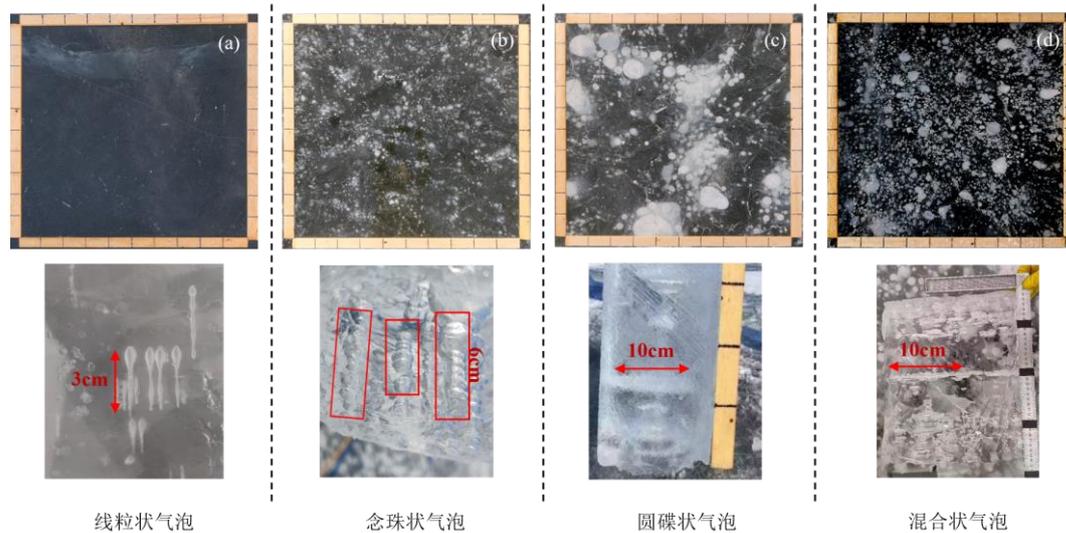


图 7 东风水库冰封气泡不同平面簇群（上）分类及垂向分布（下）特征：（a）线粒状冰封气泡、（b）念珠状冰封气泡）、（c）圆碟状冰封气泡、（d）混合装冰封气泡）

Fig. 7 Classification of different planar clusters of ice bubbles in the Dongfeng reservoir and vertical distribution characteristics

溶解在水中的空气、氧气等气体的浓度在空间分布相对均匀，同时由于在冰盖阻挡下缺乏持续供给，形成的冰封气泡主要为线粒状。由于  $\text{CH}_4$  难溶于水的特性，沉积物产生的  $\text{CH}_4$  中主要以冒泡的形式释放，在开放水体也可以观察到这些气泡常成串释放。当冰盖形成后，一些气泡会在冰下聚集并融合形成更大的气泡，后伴随着冰的生长被包裹，这些气体被冻结后形成的冰封气泡直径通常在 1~10cm 或者更大，单个气泡形状也多接近扁平的圆形。线粒状气泡有别于沉积物含  $\text{CH}_4$  气体产生白色斑块状冰封气泡，难以在无人机中观测到，在一些研究中也把这部分气泡视为“背景冒泡”<sup>[13]</sup>，不作为  $\text{CH}_4$  冒泡的研究对象。念珠状气泡主要分布在 R2 区域，也是东风水库最多的冰封气泡类型，无人机影像中的这部分气泡亮度低，多成片出现，轮廓不够清晰，分割分类准确度较低，念珠状气泡在 R2 区的广泛分布是造成气泡分类精度较低的直接原因。R1 区以圆碟状为主，其亮度较大，边缘较为清晰，有着较高的分类的精度。R3 区的气泡主要由混合状气泡与念珠状气泡构成，在分类难度上低于 R2 区。此外，冰封气泡在水平二维视角下会呈现一定程度的重叠与累积，多个气泡形成的簇群形态上不同于单个近似于圆形的典型气泡，这将导致在冰封气泡形态特征提取时易受较粗裂纹的干扰，影响分类提取结果。

1  
2

表 2 各样带冰封气泡提取及空间自相关性分析结果  
Tab. 2 Bubble classification and Moran's I calculation results for each sample Strip

区域	样带编号	样带面积(m <sup>2</sup> )	气泡总面积 (m <sup>2</sup> )	气泡面积占 样带比例	气泡面积占 库尾比例	Moran's I	Z 值	高-高聚类区域 占气泡区比例	低-低聚类区域 占气泡区比例
R1	R1_S1	6630	309	4.6%	0.025%	0.89**	138.79	25.8%	38.6%
	R1_S2	6760	192	2.8%	0.015%	0.79**	130.01	16.7%	25.5%
	R1_S3	4130	110	2.6%	0.008%	0.83**	105.13	15.8%	22.5%
	R1_S4	3620	133	3.7%	0.01%	0.85**	101.6	24.8%	49.5%
小计		21140	744	3.5%	0.059%	-	-	20.7%	-
R2	R2_S1	12500	346	2.8%	0.027%	0.86**	191.91	18.7%	29.1%
	R2_S2	7580	591	7.8%	0.046%	0.85**	146.11	25.6%	43.7%
	R2_S3	6030	455	7.5%	0.036%	0.87**	132.97	26.1%	30.71%
	R2_S4	2590	100	3.8%	0.008	0.81**	81.97	20.8%	37.5%
小计		28,700	1492	5.2%	0.118%	-	-	22.3%	
R3	R3_S1	460	12	2.7%	-	0.82**	141.56	12.4%	47.3%
	R3_S2	570	18	3.1%	-	0.86**	110.33	17.2%	40.2%
小计		1030	30	2.9%	-	-	-	15.1%	
合计		50870	2830	5.6%	0.24%	-	-	21.5%	-

3 \*\*表示 P<0.001, 具有极显著性

### 3.2 冰封气泡识别分类的指标选取

本研究采用面向对象法，基于无人机航拍影像提取冰封气泡的总体精度在 80% 以上，为探寻水库  $\text{CH}_4$  释放热区的研究提供了一种可能的手段，分类指标的选取及指标间组合是分类的不确定性来源之一，分类指标的选取影响着最终分类的效果。冰面与气泡在灰度值上存在较大差异，冰面灰度值通常低于 85，气泡灰度值通常大于 100，因此，冰面和气泡比较容易被分辨开来。冰面上还广泛存在着冰生长过程中因相互挤压碰撞产生的裂纹，这些裂纹在颜色、亮度与冰封气泡较为接近，在提取的过程容易与冰封气泡混淆，所以，气泡与冰面裂纹的区分也是分类的重点之一。人工选取选择气泡与裂纹目标各 100 个，探究二者在几何形态，包括长宽比（Length/width）、紧致度（Compactness）、圆度（Roundness）、密度（Density）、椭圆拟合度（Elliptic fit）及亮度（Brightness）等指标的差异（如图 8）。冰封气泡与冰裂纹在上述指标中除亮度外均存在显著差异（ $p < 0.05, N = 100$ ）。裂纹在上述 6 个指标的变化范围较大，这是由于裂纹间形状差异较大，难以用较为集中的范围描述所有裂纹。气泡的变化范围则比较集中，长宽比、紧致度及密度均在 1.5 上下浮动，密度、椭圆拟合度的变化范围分别在 0.5、0.8 左右，亮度的变化范围较为离散，这是由于部分气泡亮度随直径增大而增大。一些裂纹的特征值与气泡的特征值仍有重叠部分，会导致一定程度的错分现象，为保证分类效果，需要采取一定分类策略。本研究主要从气泡与裂纹的亮度及几何特征出发进行分类，石晓光等关于气泡对光谱反射率的研究则为多光谱技术应用到气泡分类中提供了思路<sup>[16]</sup>。此外，大部分气泡在空间上呈现出聚类分布的特征，在上述几何特征的限制下，考虑结合邻近对象的关系可以进一步提高分类的准确性<sup>[25]</sup>。

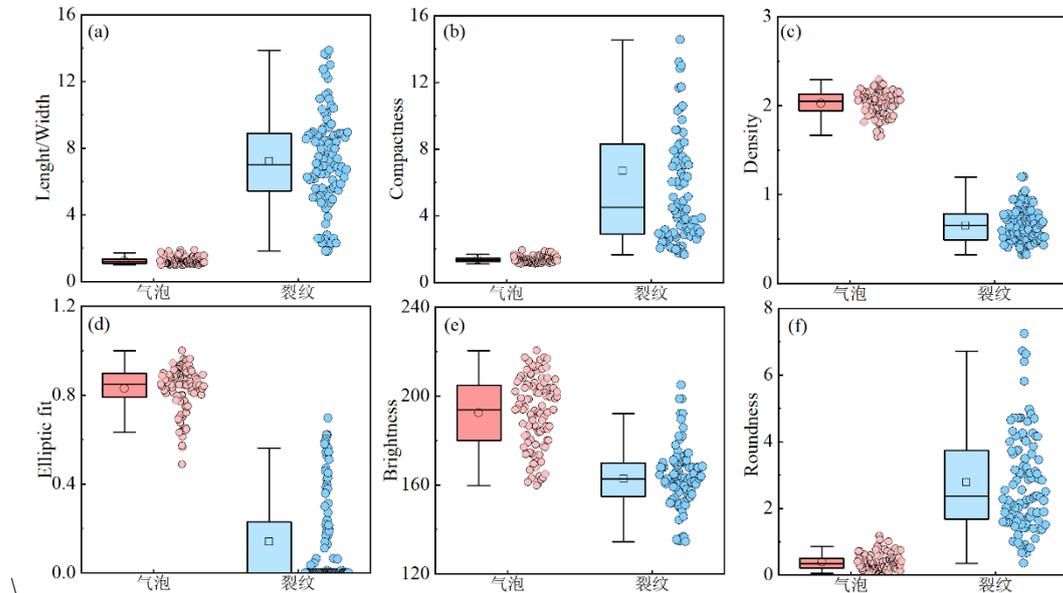


图 8 气泡与裂纹间不同参数值对比

Fig. 8 Comparison of different parameter values between bubbles and cracks

### 3.3 影响冰封气泡分布差异性的关键因素

从本研究于 2022 年冬季不同时期对库尾结冰的动态观测结果来看，初冰日后 15 天水面上存在约 20% 的未冻结区域，而一些近岸区域冰厚达到 35cm，接近最大冰厚（40cm）。初冰后约 40 天水面已完全冻结，不同区域间冰厚差异不大（35~40cm），后冻结区域主要以迅速冻结形成的黑冰为主，冰中虽也存在冰封气泡，但其密度要明显低于先冻结区域。对比 2021 年、2022 年、2023 年的现场观测来看，气泡在冰中的垂向分布也存在显著的年际差异，且缺乏明确的规律性。2021 年，气泡主要集中在冰体中层（冰面下约 20 cm）；2022 年，气泡集中在冰的表层和底层（冰面上约 6 cm，冰面下约 35 cm），中层几乎没有分布；2023 年，气泡主要集中在冰体底层（冰面下约 35 cm），仅 2022 年与李志军<sup>[26]</sup>的研究结果（表层冰气泡含量大于冰层内部）一致，其余年份的气泡分布沿深度方向呈现波动。

冰封气泡的形成是两个过程共同作用的结果：一是气泡在沉积物中产生、传输到表层水体；二是冰盖阻挡气泡并持续向下生长包裹冰封气泡<sup>[27]</sup>。因此，沉积物产生气泡的释放速率以及由气温主导的冰生长速率<sup>[28]</sup>都会影响冰封气泡的水平及垂向分布特征。沉积物作为  $\text{CH}_4$  气泡的主要来源，沉积物的厌氧条件<sup>[29]</sup>、产  $\text{CH}_4$  菌活性与丰度<sup>[30]</sup>、总有机碳（Total Organic Carbon, TOC）<sup>[31]</sup>等因素都影响着  $\text{CH}_4$  的生成，而沉积



成与冰封气泡提取精度，形态学顶帽变换可以有效抑制所拍摄影像图片的过曝现象，降低亮度不均对纹理信息的影响，提高了冰封气泡的识别效率。

2) 利用面向对象的分类方法进行冰封气泡提取的总体精度在 0.8 以上，不同冰封气泡区域间分类精度存在差异的主要原因是单个气泡的大小存在差异，冰面上由于冰体间相互挤压碰撞产生的白色裂纹是分类误差的主要来源，利用冰封气泡与裂纹在几何形态（长宽比、紧致度、圆度、密度、椭圆拟合度等）的差异性能够进行二者的有效区分，从而实现冰封气泡的高效识别。

3) 冰封气泡在空间的分布上呈现出显著的聚类特征。在地面调查中划分的三个冰封气泡区域内部(R1、R2、R3) 气泡密度的空间分布仍然较为悬殊，气泡总面积占库尾的 0.24%，被划分为“高-高”聚类的冰封气泡热点区域占库尾总面积的 0.9%；沉积物的 TOC 含量以及冰生长速率等因素都会影响冰封气泡的分布。冰封气泡特征识别对 CH<sub>4</sub> 冒泡分布热区捕捉有着积极的指示意义。

## 5 附录

附表 1-2 及附图 1-5 详见 DOI(10.18307/2025.0652)

## 6 参考文献

- [1] Yang L, Li H, Yue C et al. Seasonal and spatial variability of methane emissions from a subtropical reservoir in Eastern China. *Biogeosciences Discussion*, 2018. DOI: 10.5194/bg-2018-195.
- [2] Keller PS, Marcé R, Obrador B et al. Global carbon budget of reservoirs is overturned by the quantification of drawdown areas. *Nature Geoscience*, 2021, **14**: 402–408. DOI:10.1038/s41561-021-00734-z.
- [3] Soued C, Harrison JA, Mercier BS et al. Reservoir CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions and their climate impact over the period 1900–2060. *Nature Geoscience*, 2022, **15**: 700–705. DOI:10.1038/s41561-022-01004-2.
- [4] Maeck A, Delsontro T, McGinnis D et al. Sediment trapping by dams creates methane emission hot spots. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47** (15): 8130–8137. DOI: 10.1021/es4003907.
- [5] Jin Y, Chen XQ, Guan HP et al. Bubbles dominated the significant spatiotemporal variability and accumulation of methane concentrations in an ice-covered reservoir. *Science of the Total Environment*, 2024, **918**: 170362. DOI:10.1016/j.scitotenv.2024.170362.
- [6] Johnson MS, Matthews E, Bastviken D et al. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, **126**: e2021JG006305. DOI:10.1029/2021JG006305.
- [7] Bridget RD, John A, Harrison et al. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces A New Global Synthesis. *BioScience*, 2016, **66**(11): 949–964. DOI:10.1093/biosci/biw117.
- [8] Bastviken D, Tranvik LJ, Downing JA et al. Freshwater Methane Emissions Offset the Continental Carbon Sink. *Science*, 2011, **331**: 50. DOI:10.1126/science.1196808.
- [9] Maartje CK, Bernhard L, Jeffrey AC et al. Surface water temperature observations and ice phenology estimations for 1.4 million lakes globally. *Remote Sensing of Environment*, 2024, **308**: 114164. DOI: 10.1016/j.rse.2024.114164.
- [10] Matthew SJ, Elaine M, Du JY et al. Methane Emission From Global Lakes: New Spatiotemporal Data and Observation-Driven Modeling of Methane Dynamics Indicates Lower Emissions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2022, **127**(7): e2022JG006793. DOI: 10.1029/2022 JG006793.
- [11] Walter K, Vas DA, Brosius L et al. Estimating methane emissions from northern lakes using ice-bubble surveys. *Limnology & Oceanography: Methods*, **8**(11): 1541–5856. DOI:10.4319/lom.2010.8.0592.
- [12] Zhang XY, Yang KL, Lin YW et al. A comparison between Pixel-based deep learning and Object based image. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, **209**: 107822. DOI:10.1016/j.compag.2023.107822.
- [13] Walter K, Zimov S, Chanton J et al. Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming. *Nature*, 2006, **443**: 71–75. DOI: 10.1038/nature05040.
- [14] Martin W, Crill PM, Bastviken D et al. Bubbles trapped in arctic lake ice: Potential implications for methane emissions. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**: G03044. DOI:10.1029/2011JG001761.
- [15] Lindgren P, Grosse G, Meyer FJ et al. An Object-Based Classification Method to Detect Methane Ebullition Bubbles in Early Winter Lake Ice. *Remote Sensing*, 2019, **11**(7): 822. DOI:10.3390/rs11070822.
- [16] Pointner G, Bartsch A, Dvornikov Y et al. Mapping potential signs of gas emissions in ice of Lake Neyto, Yamal, Russia, using synthetic aperture radar and multispectral remote sensing data. *The Cryosphere*, 2021, **15**: 1907–1929. DOI:10.5194/tc-15-1907-2021.
- [17] Ingram M, Walter K, Sachs T et al. Remote sensing northern lake methane ebullition. *Nature Climate Change*, 2020, **10**: 511–517. DOI:10.1038/s41558-020-0762-8.
- [18] Shi XG, Yang Q, Zhou C et al. Spectral characteristics and influencing factors of lake ice in Lake Chagan during frozen season. *Journal of Lake Sciences*, 2023, **35**(4): 1491–1500. DOI: 10.18307/2023.0444. [石晓光,杨倩, 周超等. 查干湖冰封期光谱特征及影响因素. 湖泊科学, 2023, **35**(4): 1491–1500.]
- [19] Walter K, Peter Anthony, Guido Grosse. Geologic methane seeps along boundaries of Arctic permafrost thaw and melting glaciers. *Nature Geoscience*, 2012, **5**: 419–426. DOI:10.1038/ngeo1480.
- [20] 张弛. 基于 QUAL2K 模型的复州河污染特征模拟及其治理方案研究[学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [21] Chen H, Wu YY, Yuan XZ et al. Methane emissions from newly created marshes in the drawdown. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **116**: D21306. DOI:10.1029/2011JD016244.
- [22] Zeng M, Li JX, Zhang P. The design of Top-Hat morphological filter and application to infrared target detection. *Infrared Physics & Technology*, 2006, **48**: 67–76. DOI: 10.1016/j.infrared.2005.04.006.
- [23] Julian I, Fanuel L, Prosun B et al. Spatial analysis and GIS mapping of regional hotspots and potential health risk of fluoride concentrations in groundwater of northern Tanzania. *Science of the Total Environment*, 2020, **735**: 139584. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139584.
- [24] Zhang Y, Li ZJ, Li CJ et al. Microstructure characteristics of river ice in Inner Mongolia section of the Yellow River and its

- 
- influencing factors. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **52**(12): 1418–1429. DOI:10.13243/j.cnki.slxh.20210235. [张邀丹, 李志军, 李春江等. 黄河内蒙段河冰微结构特性及影响因素分析. 水利学报, 2021, **52**(12): 1418-1429.]
- [25] Mohammad D. Hossain, Chen DG. Segmentation for Object-Based Image Analysis (OBIA) A review of algorithms and challenges from remote sensing perspective. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, **150**: 115-134. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.02.009.
- [26] Li ZJ, Jia Q, Huang WF et al. Characteristics of ice crystals air bubbles and densities of fresh ice in a reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, **40**(11):1333-1338. DOI :10.13243/j.cnki.slxh.2009.11.002 [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. 水利学报, 2009, **40**(11): 1333-1338. ]
- [27] Walter K, Engram M, Duguay CR et al. The Potential Use of Synthetic Aperture Radar for Estimating Methane Ebullition From Arctic Lakes. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2008, **44**: 305-315. DOI:10.1111/j.1752-1688.2007.00163.x.
- [28] Li N, Lei R, Heil P et al. Seasonal and interannual variability of the landfast ice mass balance between 2009 and 2018 in Prydz Bay, East Antarctica. *The Cryosphere*, 2023, **17**:917–937. DOI:10.5194/tc-17-917-2023.
- [29] Sun HY, Yu RH, Liu XY. Drivers of spatial and seasonal variations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes at the sediment water interface in a shallow eutrophic lake. *Water Research*, 2022, **222**: 118916. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118916.
- [30] Berberich ME, Beaulieu JJ, Hamilton TL et al. Spatial variability of sediment methane production and methanogen communities within a eutrophic reservoir: Importance of organic matter source and quantity. *Limnology & Oceanography*, 2020, **65**: 1336-1358. DOI:10.1002/lno.11392.
- [31] Guan HP, Chen XQ, Jin Y et al. Hypolimnetic oxygen depletion by sediment-based reduced substances in a reservoir formerly affected by acid mine drainage. *Ecological Indicators*, 2023, **151**: 110301. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110301.
- [32] Liu L, Wilkinson J, Koca K et al. The role of sediment structure in gas bubble storage and release, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, **121**:1992–2005. DOI:10.1002/2016JG003456.
- [33] Lindgren P, Grosse G, Walter K et al. Detection and spatiotemporal analysis of methane ebullition on thermokarst lake ice using high-resolution optical aerial imagery. *Biogeosciences*. 2016, **13**:27-44. DOI: 10.5194/bg-13-27-2016.
- [34] Wilkinson J, Maeck A, Alshboul Z et al. Continuous seasonal river ebullition measurements linked to sediment methane formation. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(22):13121-13129. DOI: 10.1021/acs.est.5b01525.
- [35] Tuser M, Picek T, Sajdlova Z et al. Data from: seasonal and spatial dynamics of gas ebullition in a temperate water-storage reservoir. *Water Resources Research*. 2017, **53**(10), 8266-8276. DOI: 10.1002/2017WR020694.
- [36] Marcon L, Bleninger T, Mnnich M et al. Correction to: high-frequency measurements of gas ebullition in a brazilian subtropical reservoir—identification of relevant triggers and seasonal patterns. *Environmental monitoring and assessment*. 2019, **191**:357. DOI: 10.1007/s10661-019-7498-9.
- [37] Ashton GD. Thin ice growth. *Water Resources Research*, 1989. DOI:10.1029/WR025i003 p00564.
- [38] Higgins TM, McCutchan JH, Lewis W. Nitrogen ebullition in a Colorado plains river, *Biogeochemistry*. 2008, **89**(3):367-377. DOI: 10.1038/281291a0.
- [39] Yang L, Li H, Yue C et al. Seasonal and spatial variability of methane emissions from a subtropical reservoir in Eastern China. *Biogeosciences*. 2018, 1-37. DOI: 10.5194/bg-2018-195.
- [40] DelSontro T, Boutet L, St-Pierre A et al. Methane ebullition and diffusion from northern ponds and lakes regulated by the interaction between temperature and system productivity. *Limnology & Oceanography*. 2016, **61**: S62-S77. DOI: 10.1002/lno.10335.
- [41] DelSontro T, McGinnis DF, Sobek S et al. Extreme methane emissions from a Swiss hydropower reservoir: Contribution from bubbling sediments[J]. *Environmental Science & Technology*. 2010, **44**:2419-2425. DOI: 10.1021/es9031369.
- [42] Gálfalk M, Olofsson G, Crill P et al. Making methane visible. *Nature Clim Change*, 2016, **6**: 426–430. DOI: 10.1038/nclimate2877.