

文章编号 1004-924X(2025)12-1971-13

基于星载激光雷达光子分布特征的 湖面近岸水体浊度反演

陈 恒, 何 荣*, 吴晓玲, 张帅帅, 朱晨晨
(河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要:为实现利用星载激光雷达数据反演湖面近岸水体浊度,本文对 ICESat-2 等数据进行处理以提取湖面水体光子分布特征,基于不同浊度条件下湖面光子分布特征不同的特性反演浊度。本文以北美五大湖区的伊利湖为研究区域,采用自适应参数的剪枝四叉树算法对 ICESat-2 的 ATL03 级数据进行去噪,提取湖面光子点数据,并结合实测数据获取了湖面光子的穿透深度、光子密度、衰减速率三个方面的关键光子特征。通过整合实测浊度数据及光子点特征数据,运用机器学习回归算法反演浊度。实验结果表明,随机森林(Random Forest)算法在浊度反演中表现最佳,其决定系数(R^2)达到 0.93,平均绝对误差(MAE)为 2.04 NTU,均方根误差(RMSE)为 2.67 NTU,结果表明该方法在 0~50 NTU 浊度范围内具有较高的反演精度。为进一步验证方法在不同浊度条件下的适用性,将实验数据划分为中低浊度组(0~30 NTU)和高浊度组(>30 NTU)进行对比分析。结果显示中低浊度组的反演精度略高于高浊度组。为湖泊水体浊度的遥感监测提供了新的技术途径。

关键词:ICESat-2;湖面近岸水体;浊度反演;激光雷达;随机森林

中图分类号:TN958.98 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253312.1971 **CSTR:**32169.14.OPE.20253312.1971

Inversion of nearshore lake water turbidity based on photon distribution characteristics from spaceborne lidar

CHEN Heng, HE Rong*, WU Xiaoling, ZHANG Shuaishuai, ZHU Chenchen

(School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University,
Jiaozuo 454000, China)

* Corresponding author, E-mail: hero@hpu.edu.cn

Abstract: To enable the retrieval of nearshore lake-water turbidity using spaceborne LiDAR data, this study processed ICESat-2 data to extract photon-distribution characteristics over lake surfaces. Leveraging the observed variation in photon-distribution patterns under different turbidity conditions, turbidity levels were inferred accordingly. Lake Erie, one of the North American Great Lakes, was selected as the study area. An adaptive-parameter pruned quadtree algorithm was employed to denoise the ATL03 photon data from ICESat-2, isolating valid water-surface photon returns. Key photon features-penetration depth, photon density, and attenuation rate-were extracted from the processed data and matched with in situ turbidity

收稿日期:2025-03-06;修订日期:2025-04-22.

基金项目:NSFC-区域创新发展联合基金重点项目(No. U22A20566)

measurements. A turbidity-retrieval model was then developed using machine-learning regression algorithms. Experimental results demonstrate that the Random Forest algorithm yields the best performance, achieving a coefficient of determination (R^2) of 0.91, a mean absolute error (MAE) of 1.66 NTU, and a root mean square error (RMSE) of 2.17 NTU, indicating high retrieval accuracy within the 0-50 NTU turbidity range. To further assess the method's applicability under different turbidity conditions, the dataset is divided into low-to-moderate turbidity (0-30 NTU) and high turbidity (>30 NTU) subsets. Results show that retrieval accuracy is slightly higher for the low-to-moderate turbidity group. This study provides a novel technical approach for remote sensing-based monitoring of lake water turbidity.

Key words: ICESat-2; nearshore lake surface water; turbidity inversion; lidar; random forest

1 引 言

水体浊度是衡量水质状况的重要参数,直接反映水中悬浮颗粒物浓度,对水生态系统结构与功能有重要影响,因此对其进行精确监测具有重要科学意义^[1-2]。传统被动式海洋水色传感器被广泛应用于获取水质的信息^[3-4]。传统的水体浊度反演方法主要依靠多光谱光学影像,基于水体反射率与浊度之间统计关系建立经验或半经验模型估算浊度。Ma 等人(2021)通过简单回归、偏最小二乘回归、支持向量回归等算法,利用 Sentinel-2 影像数据和机器学习算法,实现了对中国东北湖泊水体浊度的遥感监测^[5];Zhang 等人(2024)利用 Sentinel-2 遥感影像和模型融合技术,对 2016~2022 年中国山东省南四湖的叶绿素 a 浓度和浊度进行评估^[6]。

ICESat-2 (Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2) 激光雷达卫星拥有采集高密度点云的能力,展现出了明显的测量精度和空间分辨率优势^[7-8]。该卫星已在森林地表生物量估算、冰川变化探测等领域有了广泛应用,充分展示了其在环境监测和地球科学研究中的潜力^[9-10]。在水体研究方面,ICESat-2 被用于水位测定、海底地形探测等,其在清澈水体中表现出优秀的穿透能力,可探测至水下数十米深度,为其获取水柱剖面信息提供了技术可行性^[11-12]。光子提取方面,Liu 等人(2022)通过多级去噪和剪枝四叉树算法实现强噪声背景下的点云去噪,在强噪声背景下有较高的精度^[13];Zhou 等人(2023)利用粗、精提取和高斯函数拟合滤波提取了海面光子信号并计算海浪要素^[14];Chen 等人(2025)基于信号光子在水

体中的密度空间分布特点,提出了自适应空间滤波的测深方法,能准确识别水面光子^[15]。近年来,利用 ICESat-2 水体剖面信息反演水体光学特性或水质信息的研究取得显著进展^[16-17]。Parrish 等人(2021)通过随机森林回归算法,基于 ICESat-2 数据实现了水体下行辐照度漫衰减系数的精确测量^[18];Lu 等人(2021)使用激光雷达数据成功提取了海洋次表层光学特性,补充了传统海洋水色观测数据的不足^[19];Watkins 等人(2023)进一步验证了 ICESat-2 在测量淡水湖泊水深、下行辐照度漫衰减系数(K_d)及颗粒后向散射系数(bbp)方面的可靠性^[20];E. F. Eidam 等人(2024)对海洋环境下 ICESat-2 数据进行了噪声去除、bin 尺寸选择等多项敏感性测试,为从星载激光雷达光子剖面计算 K_d 提供了处理策略和建议工作流程^[21];Zhang 等人(2024)使用 ICESat-2 数据与光学卫星数据,建立了获取海洋区域的漫衰减系数和叶绿素 a 浓度垂直剖面信息的反演方法^[22]。

现有利用激光雷达提取水质参数的研究方法主要依赖水下 3~15 m 深度范围内的光子数据,提取的水质参数有叶绿素 a 浓度、下行辐照度漫衰减系数及颗粒后向散射系数等,虽然以上信息与浊度相关,但没有直接对湖面水体浊度进行反演。而高浊度水体中激光难以穿透至该深度,因此这些方法适用于清澈水体环境。深层水体中的信号光子分布存在显著差异,在信号接收和反射最为明显的水体表层区域,光子分布同样呈现出明显特征差异,这为进一步拓展 ICESat-2 在水体光学特性研究中的应用提供了新思路。本文以五大湖的伊利湖为研究区,拟通过提取不同

湖面水体浊度下 ICESat-2 光子不同的分布特征,利用这些特征与浊度数据反演湖面水体浊度,并进行精度验证。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

研究区域为北美五大湖区的伊利湖,其西岸与南岸分布有多个水质监测站点。伊利湖地理坐标范围为 41°N~43°N,78°W~83°W。实验使用了五个测站的实测数据。研究区位置与测站具体位置如图 1 所示。各测站的位置与周围环境情况如表 1 所示。

表 1 观测站位置及环境特征
Tab. 1 Location and environmental characteristics of observation stations

测站名称	坐标	环境特征
Toledo	41° 41.6 N, 83° 28.3 W	紧邻西南部的底特律河口,周围主要为城市及港口区,有活跃的航运业和制造业,使用测站数据浊度范围为 6~49 NTU,平均浊度为 27.4 NTU
Fermi power plant	41° 57.6 N, 83° 15.4 W	周围是高度工业化的区域,周围工业设施包括发电厂、钢铁厂、化工厂等,使用测站数据浊度范围为 10~45 NTU,平均浊度为 28.3 NTU
Marblehead	41° 32.6 N, 82° 43.9 W	该区域主要依赖于渔业、旅游业和一些农业活动,春秋季节,渔业活动较为频繁,使用测站浊度数据范围为 17~48 NTU,平均浊度为 29.4 NTU
Cleveland	41° 32.65 N, 83° 38.1 W	附近有活跃的海港和铁路交通,周围是重工业和服务业的结合体,使用测站浊度数据范围为 21~50 NTU,平均浊度为 31.8 NTU
Fairport	41° 45.6 N, 81° 16.9 W	周围的经济活动主要依赖于渔业、旅游业和小规模的农业,使用测站浊度数据范围为 20~55 NTU,平均浊度为 33 NTU

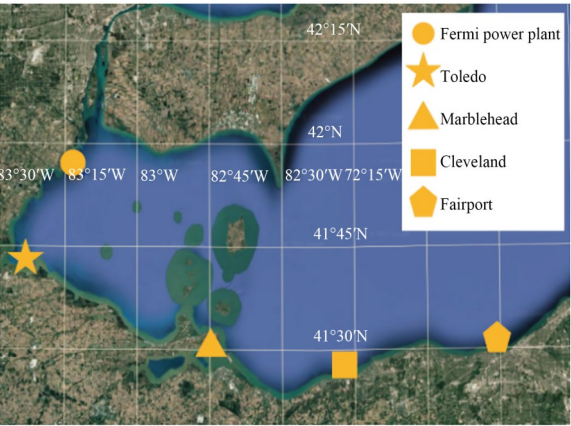


图 1 研究区及测站概况图
Fig. 1 Overview of the research area and measuring station

2.2 水质与水位数据

美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供了自 ICESat-2 卫星发射以来伊利湖每日多个站点的水位数据,其时间分辨率为 6 min,具体站点位置如图 1 所示。

此外,NOAA 还提供了伊利湖西岸的水质监

测数据。由于海面风场和洋流的影响,水质数据可能存在一定偏差,因此在时间上选取前后 5 天的数据进行校正,并结合水质站点与水位站点距离、空间位置关系以及风场等因素综合考虑取值。西南区域的水质与水位观测站距离较近,可直接使用当日数据。南岸水质数据则来自 Seagull 平台的监测系统。水位与水质数据均具有较高的时间分辨率,且水体采样深度均在水面下 1 m 以内。

2.3 ICESat-2/Atlas 数据

本研究采用 ICESat-2 的 ATL03 级数据作为实验数据。以湖水沿岸为边界,向湖内构建 5 km 的缓冲区并生成 shp 文件,以此作为 ICESat-2 数据的空间筛选边界。数据时间跨度为 2019 年 2 月 1 日至 2024 年 11 月 5 日。ICESat-2 激光雷达卫星具有高灵敏度的优点,但其数据质量易受多种环境因素影响,如降水(雨、雪)、雾等气象条件会导致信号光子出现缺失、分层或显著波动现象。此外,卫星系统本身的运行状态也会对数据质量产生影响。为确保实验结果的可靠性,本研

究基于表2通过多个条件对原始数据进行筛选,在时间范围内选取了160期较高质量数据用于实验分析。

表2 筛选标准表
Tab. 2 Filter criteria

筛选内容	标准
数据缺失	$<20\%$
湖面水体起伏	$<0.2\text{ m}$
后脉冲现象	弱
是否冰期	否

3 研究方法

本研究基于ICESat-2激光在不同浊度水体中信号光子分布特征的差异性,提出了一种水体浊度反演方法。研究通过分析激光信号光子在湖水表层的分布特性,结合水位观测数据等,提取光子点在不同浊度水体表层的分布特征。将特征数据与实测浊度数据进行整合后,采用机器学习算法通过回归算法进行反演,并对反演结果进行精度验证。为进一步探究该方法在不同浊度条件下的适用性,研究根据浊度范围对数据进行分组处理和分析。具体技术路线如图2所示。

3.1 数据预处理

ICESat-2提供多级数据产品,本研究选用ATL03级数据作为基础数据源。ICESat-2的数据格式为HDF5格式,通过对ATL03数据进行解析处理,可获取包括经纬度坐标、高程值、沿轨距离以及数据采集时间戳等多维度信息,为后续处理分析提供基础数据支撑。

研究所用的站点实测水位数据的高程与时间系统与ICESat-2所用系统不同,需要对水位数据进行高程与时间系统的转化,与ICESat-2数据保持统一。

3.2 ATL03数据去噪

原始的ATL03的数据中包含较多的噪声点,会对实验结果产生影响。首先要对ATL03数据进行去噪处理,以提取信号光子。进行一级去噪时,利用ICESat-2的ATL03数据中提供的

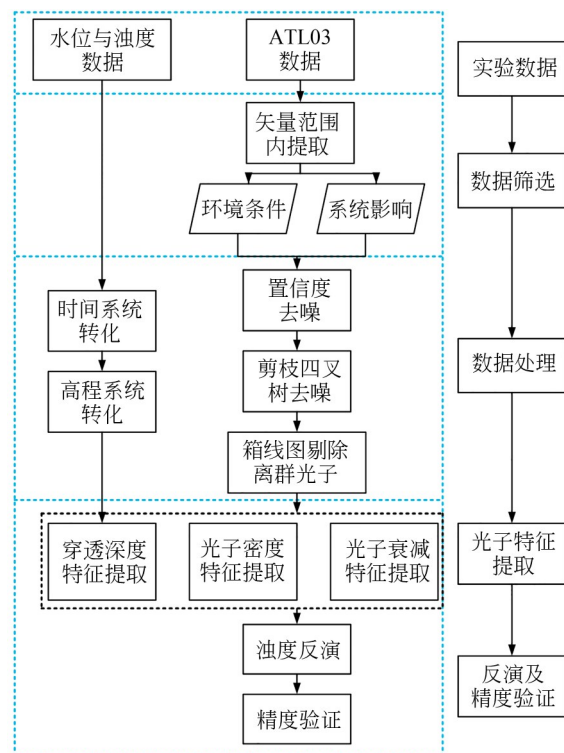


图2 处理流程图

Fig. 2 Processing flow chart

置信度和分类信息,以区分不同类型的反射信号。置信度作为回波信号可信度的衡量指标,能够有效区分地物反射与噪声信号。通过置信度值进行初步去噪,删除置信度为0的点,从而滤除部分噪声点。ICESat-2白天数据的太阳噪声会引入更多的噪声点,通过置信度筛选可以对其进行有效的去除。

在完成一级去噪后,采用剪枝四叉树算法进行二级去噪。通过四叉树的层次结构来表征光子密度,并结合大津法计算阈值,从而提高去噪效果。具体而言,首先对光子数据进行空间划分,依据光子的分布情况递归划分空间象限。划分过程的终止条件是当某个象限内的光子数量不超过设定的最大容纳值时。本文将象限内光子数量阈值设置为2,即区域内光子数量小于2个时终止划分。并根据当前子区域水平方向跨度计算空间等级。在光子稀疏区域,若四叉树划分未能有效分隔,则停止进一步划分。通过剪枝四叉树表征光子密度,并根据密度差异将光子分类为信号光子和噪声光子。然后基于大

津法自适应地确定光子密度的阈值,完成二级去噪。该步骤对所有终止划分的区域分别计算其点数与等级,以此构建权重直方图,并利用大津法进行最优阈值选择,寻找类间方差最大分割等级,计算公式如式(1):

$$\sigma^2 = \omega_1(\mu_1 - \mu)^2 + \omega_2(\mu_2 - \mu)^2, \quad (1)$$

其中: ω_1, ω_2 分别为低密度类与高密度类的加权

比例, μ_1, μ_2 为两类的加权平均等级, μ 为全局平均等级。最终选择能使 σ^2 最大的等级作为分割阈值。

在完成二级去噪后,数据中仍可能存在少量离群信号点。为消除这些光子对结果的影响,采用箱线图方法对离群点进行去除。去噪前后光子分布对比如图3所示。

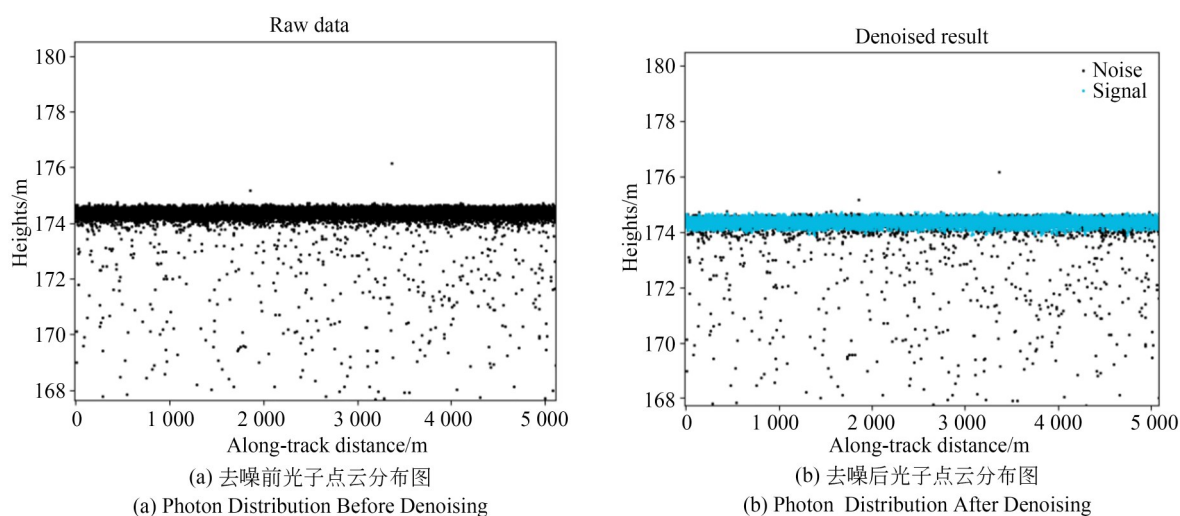


图3 去噪前后光子分布对比

Fig. 3 Comparison of photon distributions before and after denoising

去噪处理后的信号光子分布如图4所示。其沿轨距离均为5 km,图中包括局部放大图,沿轨距离为500 m。各图沿轨距离和高程跨度均保持一致。去噪处理后的光子点为近岸湖面水体表层光子点,以此为基础提取湖面水体光子分布特征。图4展示了不同浊度条件下ICESat-2光子在湖面下水柱剖面的分布特征差异,这种差异主要源于激光在湖水表面发生的折射和散射效应随浊度变化而改变。这一现象为利用湖面表层光子分布特征反演水体浊度提供了理论依据,因此需要系统提取ICESat-2光子在湖面表层的分布特征。

本研究选取伊利湖实测水位数据作为辅助数据源,通过将实测水位数据与ICESat-2提取数据进行联合计算,获得多种特征参数。现有研究表明,水体的信号光子的高程值并非真实高程,而是经过折射后返回的高程,因此在传统水位测

量研究中通常需要进行折射校正以消除高程偏移。然而,在本研究中,折射引起的高程偏移已被纳入特征提取过程,被包含在反映浊度变化的特征参数之中,故无需单独进行折射校正。具体计算方法将在下文详细阐述。为直观展示特征提取过程,在图5中提供了相关示意图。为便于数据统计与计算,本研究将每期数据按沿轨方向以500 m间隔进行分块处理。

图5(a)展示了ICESat-2一期ATL03强轨数据的光子点云图,图5(b)则为该期ATL03数据的伪波形图。伪波形图基于光子点云图,在竖直方向上按照一定的高程间隔对ICESat-2光子点云进行空间划分,每个空间包含不同数量的信号点,并将每层的信号点数量作为该层的层值。以层值为横坐标,层的高程区间为纵坐标,构建伪波形图。图5(c)展示了伪波形图的统计特征图。伪波形图包含不同层次的信号点数量等信息,进

而可用于计算 ICESat-2 信号点的近似衰减速率。此外,伪波形图作为统计分布图,还可以提取多种信号点的分布特征。下面介绍多种特征的提取方法。

3.3 光子分布特征提取

3.3.1 穿透深度特征提取

比尔-朗伯定律是描述光吸收与物质浓度之间关系的重要定律之一。比尔-朗伯定律的完整

形式如式(2):

$$A = -\lg \frac{I_t}{I_0} = \lg \frac{1}{T} = Klc, \quad (2)$$

其中: I_0 为入射光强度, I_t 为透射光强度, T 为透射比, K 为介质吸收系数, l 为吸收介质厚度, c 为吸收物质浓度。在入射光强度 I_0 不变的情况下,水体浊度 c 变化时,透射光强度将随着浓度的变化而变化,这使得水下光子在不同浊度水体下的分

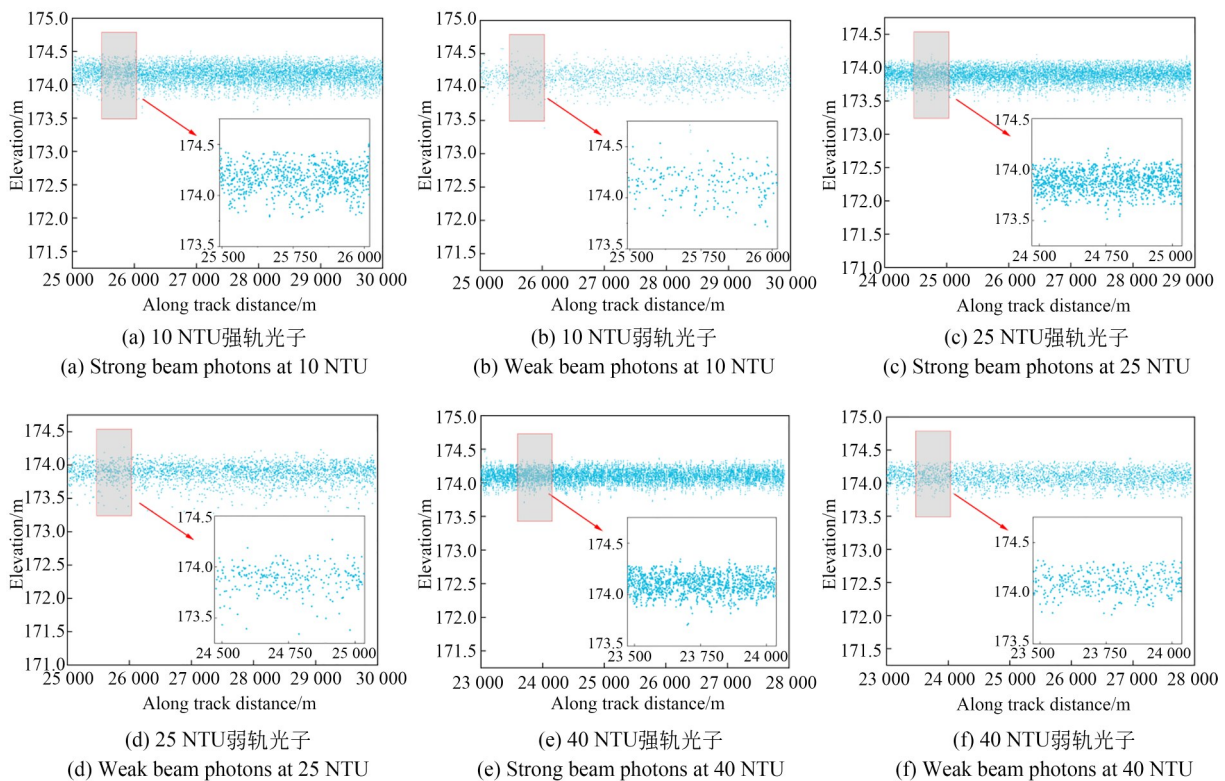


图4 不同浊度下信号点提取结果图

Fig. 4 Signal point extraction results under different turbidity

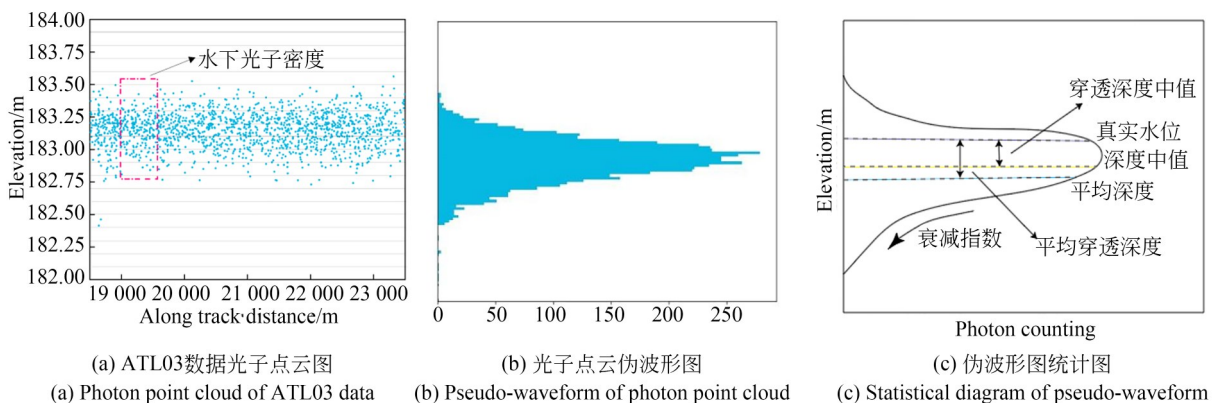


图5 特征提取示意图

Fig. 5 Feature extraction diagram

布具有不同的特征。因此,可以通过点云图和伪波形图进行分布特征的提取。首先,提取 ICESat-2 光子点的穿透深度特征。穿透深度数值上等同于 ICESat-2 光子点在介质中分布的厚度 l 。为此,首先计算了强弱轨道水下光子点高程的均值和中值。计算公式如下:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n}, \quad (3)$$

$$Median = med(H_i), \quad (4)$$

其中: μ 为 ICESat-2 光子点高程均值, $Median$ 为光子点高程中值, H_i 为单个光子点高程,通过计

算得到 ICESat-2 水下光子点的高程中值与均值。计算之后该结果需要与实测水位数据进行运算。NOAA 的实测水位数据与 ICESat-2 数据所用高程与时间系统不一致,需首先对实测数据进行高程与时间系统的转化。转化完成后通过式计算光子点平均穿透深度与穿透深度中值作为光子点的穿透深度特征。

$$Mean_depth = Water_level - \mu, \quad (5)$$

$$Middle_depth = Water_level - Median. \quad (6)$$

所提取的光子平均穿透深度和穿透深度中值与水体浊度的关系如图 6 所示。

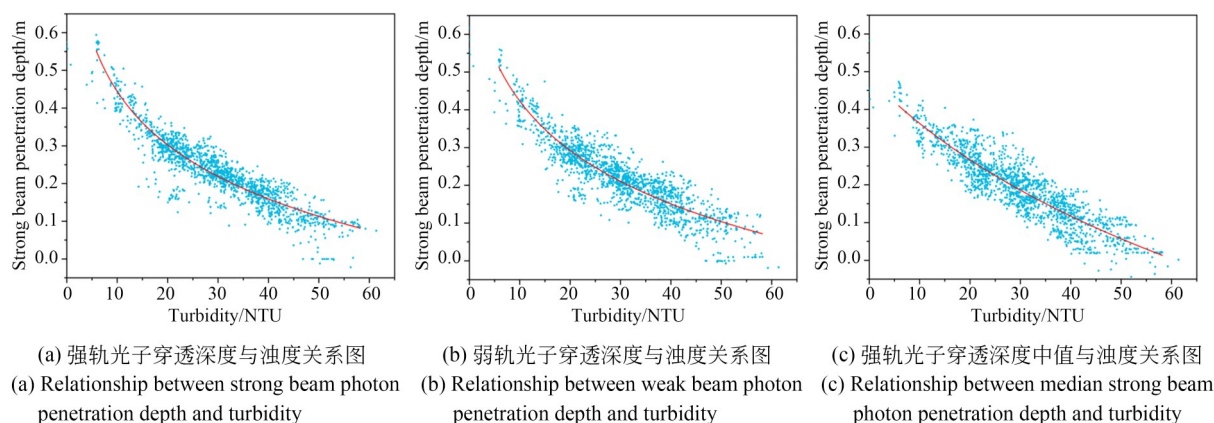


图 6 光子穿透深度特征与浊度关系图

Fig. 6 Relationship between photon penetration depth characteristics and turbidity

各项穿透深度的变化反映了光子在介质中分布厚度 l 的变化。由于前文对数据进行了空间划分,所以每个数据点代表沿轨距离 500 m 范围内光子点云的计算结果。可以观察到,所有穿透深度与浊度之间均呈现出明显的相关性。

然而,弱轨的穿透深度中值与浊度之间的相关性较差,原因在于弱轨轨道的传输能量较低,光子点数量较少,穿透深度较为随机,难以体现规律,因此决定去除该特征,保留其余特征。

3.3.2 光子密度特征提取

除光子点穿透深度存在差异外,湖面水体浊度的变化还会通过改变介质浓度 c ,从而影响 532 nm 激光在水体中的散射和折射特性,进而导致接收器获取的信号强度发生变化。这种变化表现为光子点数量差异,即信号光子在一

定空间范围内的密度差异。如图 4 所示,不同浊度条件下,特定区域内的光子点云密度呈现显著差异。为量化这一特征,本研究采用光子密度作为关键特征参数进行提取,这需要对光子点进行空间划分。具体而言,以沿轨方向 500 m 为宽度划分区域,每个区域的高度定义为该区域内光子点高程最大值与最小值之差。完成区域划分后,统计每个区域内的光子密度值,作为浊度反演的重要特征参数。计算公式如式(7):

$$Density = \frac{\#\{x_i | i = 1, 2, \dots, n\}}{ATD}, \quad (7)$$

其中: $Density$ 为光子密度, ATD 为 Along Track Distance,即 ICESat-2 光子点沿轨距离。图 7 展示了在一定区域内强轨光子点密度随湖面水体浊度变化的关系。弱轨光子密度随浊度变化情况与强轨光子类似,数量比大概为 1:4。可以看

到当湖面水体浊度上升时,一定区域内光子密度有明显上升的趋势,反映了在较高浊度环境下,激光在湖面水体中发生的折射与散射更强烈。接收器接收的信号强度更强。

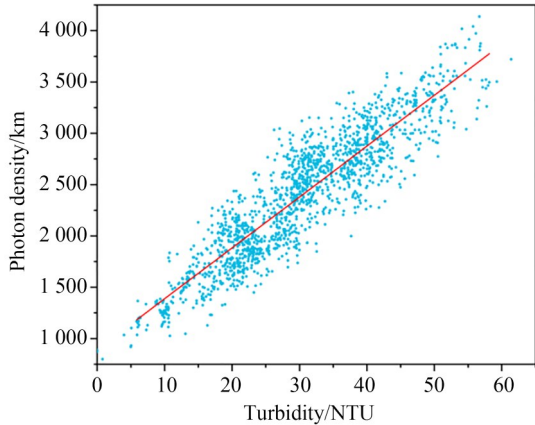


图7 光子密度与浊度关系图

Fig. 7 Relationship between photon density characteristics and turbidity

3.3.3 光子衰减速率特征提取

除了依据介质厚度 l 和介质浓度 c 提取特征外,比尔-朗伯定律中的介质吸收系数 K 与漫衰减系数 K_d 具有很强的相关性。 K_d 是描述电磁波在介质中传播时强度衰减的物理量。在ICESat-2发射的532 nm激光向水下传播的过程中,激光强度随着深度的增加而衰减,同时水下的折射和散射现象也逐渐减弱,导致回波信号的强度减弱。信号接收器接收到的信号会变弱,从而生成的信号光子点数量减少,导致不同深度水下光子点的密度不同。这也是ICESat-2伪波形中不同层次光子点密度变化的原因。衰减系数 K_d 的定义基于比尔-朗伯定律的扩展形式如式(8)所示:

$$I = I_0 e^{-k_d d}. \quad (8)$$

可以看出,入射光强度 I 与透射光强度 I_0 之间存在指数关系,这一数量关系由 K_d 值与深度 d 决定。信号的衰减通过影响光的强度,从而影响了水下不同深度光子点的密度。当湖面水体的浑浊度不同,ICESat-2激光的衰减程度也会有所不同。在伪波形图中,表现为光子数量峰值以下部分的衰减速率不同。通过计算不同浊度下光子数量的衰减速率,可以提取其衰减特征。主要方法是对伪波形图中的衰减曲线

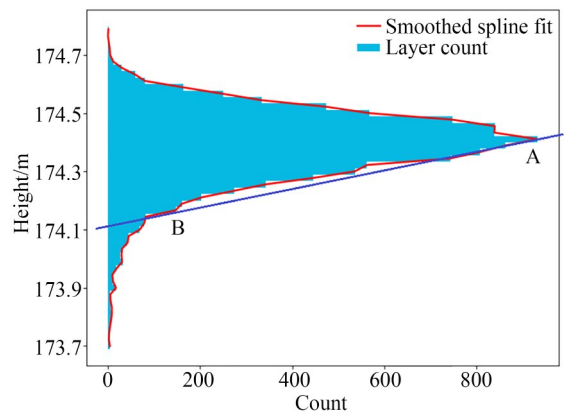
进行拟合,并通过合适的指标来表示衰减速率。

在实验过程中发现,当伪波形的分层数量较少时,伪波形的轮廓线波动较大,无法有效提取衰减特征。而当分层数量过多时,进一步增加层数会导致轮廓线变化非常微小。基于实验探究,设置层数为50。分层后,采用样条插值法进行拟合,并进行平滑处理。

由于直接计算 K_d 值的过程复杂且计算量大,本文选择使用伪波形图中波峰以下斜率突变处(如图8中B点,若无斜率转折较大的点,B点选作伪波形图中最低点)与最高点峰值(整体最大值A)之间的斜率 k 来近似表示衰减速率,如上图8所示。

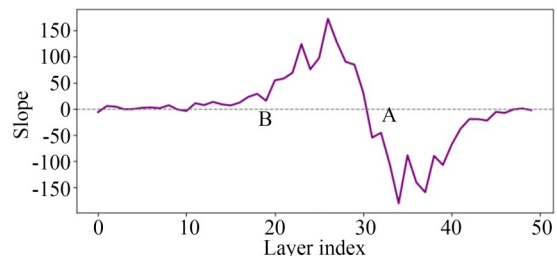
3.4 回归算法反演浊度

本实验基于比尔-朗伯定律对研究区域的ICESat-2数据进行处理,提取了与吸收系数 k 、介



(a) 近似衰减速率斜率图

(a) Approximate attenuation rate slope map



(b) 伪波形斜率图

(b) Slope map of the pseudo-waveform

图8 伪波形图中近似求得衰减速率

Fig. 8 Attenuation rate is approximately derived from the pseudo-waveform

质厚度 l 和介质浓度 c 三个关键参数相关的分布特征。特征提取完成后,将全部特征数据与对应浊度观测值进行整合。实验共使用 160 期观测数据,每期数据沿轨方向跨度为 5 km。根据前文所述的空间划分方法,将每期数据划分为 10 个 500 m 的区段。由于相邻监测站点的湖面水体浊度具有较高的一致性,且考虑到实验区域划分尺度较小,可假设每个区段内的水体浊度均匀分布。因此,将每个 500 m 区段作为独立样本,最终获得 1 600 个数据样本。完成数据整合后,采用多种机器学习回归算法对浊度数据与特征数据进行建模分析,通过多项评价指标评估回归效果,从而确定最优的反演算法。

4 结果分析

4.1 特征统计结果分析

实验过程中对 ICESat-2 水下光子多个分布

特征进行提取,为比较不同测站的特征水平,统计了表 3。每个特征的数值都以该测站数据均值表示。在数据筛选时虽然对水面波浪起伏较大的数据进行了剔除,保证水面足够平静,并使用箱线图剔除离群光子点,但无法完全排除波浪起伏对特征提取造成的部分影响。

由表 3 可以看出,实验所用数据伊利湖西岸测站区域的湖面水体浊度平均水平较低,而南岸测站区域的湖面水体浊度平均水平更高。且当测站越接近时,其水质条件也越接近。结合表 3 与图 6 可知,当湖面水体浊度增加时,强弱轨道的各穿透深度均呈下降趋势。实验中发现,当湖面水体浊度达到 50 NTU 时,用本文方法测得 ICE-Sat-2 激光穿透深度几乎为 0,据式(2)分析,其原因是在研究区的水质条件下,当水体浊度达到 50 NTU 时,吸收物质的浓度影响达到雷达激光穿透能力的阈值,所以该反演方法的适用湖面水体浊度范围为 0~50 NTU。

表 3 各测站光子分布特征统计表
Tab. 3 Photon distribution characteristics at each survey station

测站	平均浊度/ NTU	强轨平均光子密 度/(个/km)	弱轨平均光子密 度/(个/km)	强轨平均穿 透深度/m	弱轨平均穿 透深度/m	强轨穿透深度 平均中值/m
Toledo	27.4	2 200	570	0.27	0.24	0.21
Fermi	28.33	2 290	560	0.25	0.24	0.20
Marblehead	29.4	2 380	580	0.24	0.23	0.18
Cleveland	31.8	2 450	590	0.19	0.18	0.16
Fairport	33	2 520	610	0.17	0.17	0.13

实验中强弱轨道的光子密度之比为 3:1 到 5:1 之间,均值约为 4:1。光子密度与卫星接收的信号强度相关,ICESat-2 的强弱轨道发射能量之比为 4:1,实验结果与之相吻合。

4.2 反演结果分析

本文共使用了随机森林(RF)、支持向量机(SVM)、梯度提升(XGBOOST)、多层感知机(MLP)四种模型进行回归运算以反演浊度。实验以研究区测站实测湖面水体浊度数据为因变量,从 ATL03 数据点云图与伪波形图中计算得到的多个水下光子分布特征为解释变量,建立回归模型,其中 80% 的数据用于建立模型,剩余 20% 数据用于模型验证。四种算法的反演结果如表 4 所示。

表 4 不同模型反演结果对照表
Tab. 4 Comparison of retrieval results using different algorithms

Model	R ²	MSE	MAE	RMSE	MedAE
RF	0.93	7.15	2.04	2.67	1.69
MLP	0.91	8.68	2.27	2.94	1.90
SVM	0.92	8.58	2.21	2.92	1.86
XGBOOST	0.9	8.76	2.31	2.97	1.93

实验结果表明,四种算法中使用随机森林(RF)模型进行回归反演浊度的精度最高。实验中森林的树的数量设置为 300,随机种子数量为 42,内部分裂所需最小样本数为 6,叶子节点所需最小样本数为 5,每棵树分裂时考虑最大特征数

量为所有特征,其结果图如图 9 所示。其决定系数 R^2 为 0.93,平均绝对误差 MAE 为 2.04 NTU,均方根误差 RMSE 为 2.67 NTU。在浊度 0~50 NTU 的范围内,该误差可以认为合理。

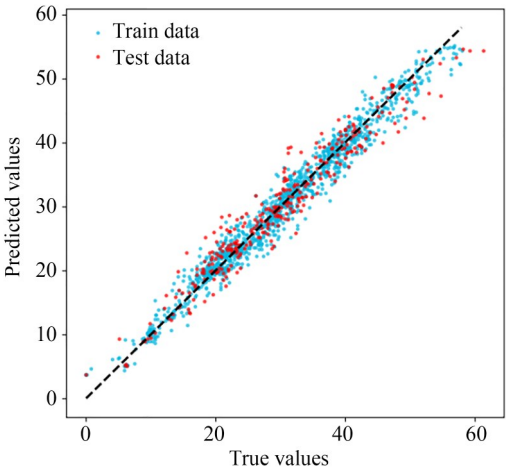


图 9 随机森林算法回归结果
Fig. 9 Random Forest Regression Results

为比较该方法在不同浊度下的性能,将实验数据进行了分组,受数据数量限制,实验分为两组,一组为 0~30 NTU 的中低浊度组 a,二组为 30~50 NTU 的高浊度组 b。中低、高浊度组分别有 840 和 760 个数据样本,样本数较为接近,可认为数量对反演结果影响较小。统计两组回归结果的多项指标如表 5 所示。从表 5 中可以看到,通过以上四种模型进行回归反演湖面水体浊度,中低浊度组的回归结果各项指标均优于高浊度组,且使用随机森林进行回归的反演效果最好,其中低浊度组 R^2 为 0.87,MAE 为 1.71 NTU, RMSE 为 2.27 NTU,而高浊度组 R^2 为 0.80, MAE 为 2.35 NTU, RMSE 为 3.02 NTU。所以本文方法在中低浊度湖面水体环境中反演效果更好。

其原因为当浊度逐渐升高时,光子穿透水体能力也随之逐渐达到极限,光子穿透深度也开始趋近于 0,此时光子穿透深度特征的敏感性降低,且当水体浊度更高时,颗粒物较多,光子在水面的折射、散射作用更为复杂,对光子分布特征的影响更大。而水体浊度较低时,颗粒物较少,发生的反射与散射现象更弱,对信号的接收与处理影响更小。因此中低浊度组的误差相比

表 5 不同浊度反演结果对照表

Tab. 5 Inversion results for different turbidity levels

Model	R^2	MSE	MAE	RMSE	MedAE
RF(a)	0.87	5.18	1.71	2.27	1.19
RF(b)	0.80	9.13	2.35	3.02	1.98
SVM(a)	0.83	6.77	2.00	2.60	1.53
SVM(b)	0.76	10.78	2.57	3.28	2.12
XGBOOST(a)	0.82	6.85	2.08	2.61	1.85
XGBOOST(b)	0.64	16.36	3.28	4.05	2.85
MLP(a)	0.83	6.79	2.01	2.60	1.54
MLP(b)	0.76	10.79	2.56	3.28	2.12

高浊度组更小。

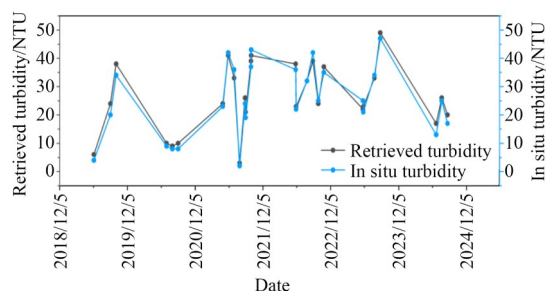
4.3 浊度时序分析

为探究研究区近岸水体浊度的季节变化差异,基于反演结果与实测数据对浊度进行了时序分析。结果表明,研究区的水体浊度变化具有较为明显的季节性。利用本文方法反演的浊度与站点实测浊度的时序图如图 10 所示。

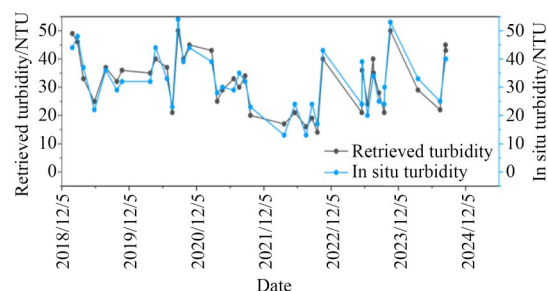
4.2 节的结果表明,实测浊度与反演浊度的差异在高浊度环境下较中低浊度环境略高,但该差异比较微小,在时序图上差异并不明显。时序图结果显示,各测站水体浊度较大的数据时间多分布在春季与秋季,而夏季的水体浊度一般较小。一年中水体浊度变化呈现先下降后上升的趋势。其变化原因主要与水体活动及周围生产活动有关。结合 4.2 分析,本文方法在春秋季节的反演精度略高于夏季。

5 结 论

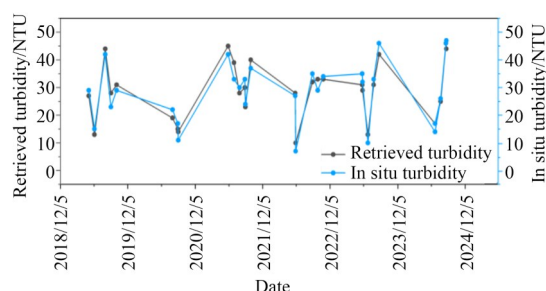
本文以伊利湖为研究区,基于 ICESat-2 能够获取水面下高精度点云的特性,提出了一种基于 ICESat-2 水面光子分布特征的湖面近岸水体浊度反演方法。对筛选好的 ATL03 数据进行水面光子点的提取,发现不同浊度下水下光子点的分布形态不同,这一特点为水下光子点分布特征的提取提供了依据。本文针对比尔-朗伯定律中影响光的强度的三个因素分别提取了光子点水下分布特征。对于介质厚度 l ,将其转化为 ICESat-2 光子点在水下能够穿透的深度,将强弱轨道数据都提取了穿透深度的平均值与中值作为穿透深度特征;介质浓度 c 影响了激光在水下的折射



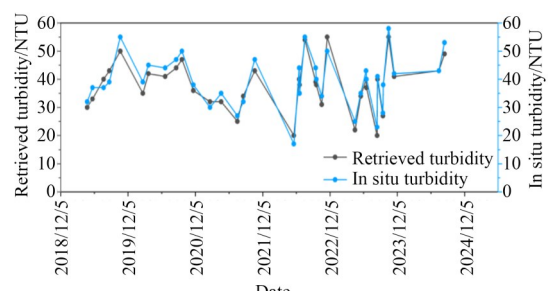
(a) Toledo测站
(a) Toledo observation station



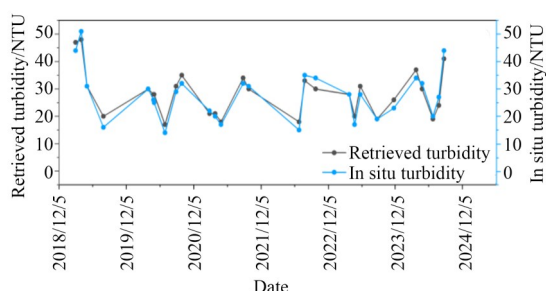
(d) Cleveland测站
(d) Cleveland observation station



(b) Fermi power plant测站
(b) Fermi power plant observation station



(e) Fairport测站
(e) Fairport observation station



(c) Marblehead测站
(c) Marblehead observation station

图 10 浊度变化时序图

Fig. 10 Time series of turbidity variations

与散射作用,导致一定区域内水下光子点数量不同,因此提取了强弱轨道一定区域内水下光子点密度作为密度特征;吸收系数 K 决定了激光在更深的区域中强度更弱,导致了水下不同深度的光子点数量不同,由伪波形图可以近似求得其衰减速率作为衰减特征。将提取的特征与浊度数据通过不同的模型进行回归处理,根据结果选出最好的回归模型。本研究的主要结论如下:

(1)不同湖面水体浊度下ICESat-2水下光子剖面点云分布形态不同,可以从多个影响因素出发提取不同的光子分布特征,且这些特征与实测浊度数据有较强的相关性;

(2)用多种模型对特征数据与实测浊度数据进行回归进而反演浊度的方法可行且结果较好,

其中效果最好的模型是随机森林模型,其回归结果的决定系数 R^2 高达0.93,平均绝对误差为2.04 NTU,均方根误差为2.67 NTU。说明本文方法能较好地反演浊度;

(3)本文的湖面水体浊度反演方法在中低浊度(<30 NTU)环境下的效果比高浊度环境下更好,其决定系数分别为0.87与0.80,均方根误差分别为2.27 NTU与3.02 NTU。本文方法在高浊度情况下保持了较好的稳定性。可以认为该方法可行。

作者贡献声明:

陈恒:实验方法的提出,数据处理,论文构思和撰写;

何荣:监督和指导实验进行,论文撰写指导与审核;

吴晓玲:查找实验相关事实依据,收集实验数据;

张帅帅:下载数据并进行筛选与整理;

朱晨晨:帮助数据处理,对内容进行核实。

参考文献:

- [1] CABALLERO I, STUMPF R P. Confronting turbidity, the major challenge for satellite-derived coastal bathymetry [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 870: 161898.
- [2] DOGLIOTTI A I, RUDDICK K G, NECHAD B, *et al.* A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156: 157-168.
- [3] ZHOU Q, WANG J R, TIAN L Q, *et al.* Remotely sensed water turbidity dynamics and its potential driving factors in Wuhan, an urbanizing city of China [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 593: 125893.
- [4] HOSSAIN A K M A, MATHIAS C, BLANTON R. Remote sensing of turbidity in the Tennessee River using landsat 8 satellite [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(18): 3785.
- [5] MA Y, SONG K S, WEN Z D, *et al.* Remote sensing of turbidity for lakes in NorthEast China using sentinel-2 images with machine learning algorithms [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 9132-9146.
- [6] ZHANG J W, MENG F, FU P J, *et al.* Tracking changes in chlorophyll-a concentration and turbidity in Nansi Lake using Sentinel-2 imagery: a novel machine learning approach [J]. *Ecological Informatics*, 2024, 81: 102597.
- [7] LU X M, HU Y X, YANG Y K. Ocean subsurface study from ICESat-2 mission [C]. 2019 *Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-Fall)*. December 17-20, 2019. Xiamen, China. IEEE, 2019: 910-918.
- [8] MARKUS T, NEUMANN T, MARTINO A, *et al.* The ice, cloud, and land elevation satellite-2 (ICESat-2): science requirements, concept, and implementation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 260-273.
- [9] DUNCANSON L, NEUENSCHWANDER A, HANCOCK S, *et al.* Biomass estimation from simulated GEDI, ICESat-2 and NISAR across environmental gradients in Sonoma County, California [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 242: 111779.
- [10] WANG Q Y, SUN W K. Seasonal cycles of high Mountain Asia glacier surface elevation detected by ICESat-2 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, 127(23): e2022JD037501.
- [11] SONG L J, SONG C Q, LUO S X, *et al.* Integrating ICESat-2 altimetry and machine learning to estimate the seasonal water level and storage variations of national-scale lakes in China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 294: 113657.
- [12] CHEN Y F, WU L, LE Y, *et al.* High-accuracy bathymetric method fusing ICESAT-2 datasets and the two-media photogrammetry model [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, 134: 104179.
- [13] 刘翔, 张立华, 戴泽源, 等. 一种无输入参数的强噪声背景下 ICESat-2 点云去噪方法 [J]. *光子学报*, 2022, 51(11): 354-364.
LIU X, ZHANG L H, DAI Z Y, *et al.* A parameter-free denoising method for ICESat-2 point cloud under strong noise [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(11): 354-364. (in Chinese)
- [14] 周智标, 周辉, 马跃, 等. ICESat-2 激光雷达海面信号提取和海浪要素计算 [J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(2): 212-220.
ZHOU Z B, ZHOU H, MA Y, *et al.* ICESat-2 lidar sea surface signal extraction and ocean wave element calculation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(2): 212-220. (in Chinese)
- [15] 湛一夫, 李帅, 张东方, 等. 自适应空间密度滤波的 ICESat-2 激光雷达测深 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2025, 50(1): 83-96.
CHEN Y F, LI S, ZHANG D F, *et al.* ICESat-2 LiDAR bathymetry based on adaptive spatial density filtering [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(1): 83-96. (in Chinese)
- [16] EIDAM E, WALKER C, BISSON K, *et al.* Novel application of icesat-2 atlas data to determine coastal light attenuation as a proxy for suspended particulate matter [C]. *OCEANS 2022, Hampton Roads*. October 17-20, 2022, Hampton Roads, VA, USA. IEEE, 2022: 1-7.
- [17] LU X M, HU Y X, OMAR A, *et al.* Lidar attenuation coefficient in the global oceans: insights from ICESat-2 mission [J]. *Optics Express*, 2023, 31(18): 29107-29118.
- [18] CORCORAN F, PARRISH C E. Diffuse attenua-

- tion coefficient (K_d) from ICESat-2 ATLAS spaceborne lidar using random-forest regression[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2021, 87(11): 831-840.
- [19] LU X M, HU Y X, YANG Y K, *et al.* New ocean subsurface optical properties from space lidars: CALIOP/CALIPSO and ATLAS/ICESat-2 [J]. *Earth and Space Science*, 2021, 8 (10) : e2021EA001839.
- [20] WATKINS R H, SAYERS M J, SHUCHMAN R A, *et al.* Validation of ICESat-2 derived data products on freshwater lakes: bathymetry, diffuse attenuation coefficient for downwelling irradiance (K_d), and particulate backscatter coefficient (b_{bp}) [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2023, 20: 1501405.
- [21] EIDAM E F, BISSON K, WANG C, *et al.* ICESat-2 and ocean particulates: a roadmap for calculating K_d from space-based lidar photon profiles [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 311: 114222.
- [22] ZHANG X C, MA Y, LI Z W, *et al.* Synergistic detection of chlorophyll-a concentration vertical profile by spaceborne lidar ICESat-2 and passive optical observations [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, 132: 104035.

作者简介:



陈 恒(2000—),男,河南商丘人,硕士研究生,2023年于河南理工大学获得学士学位,主要从事星载激光雷达应用方面研究。E-mail: 212304020075@home.hpu.edu.cn

通讯作者:



何 荣(1975—),男,河南范县人,教授,博士,2014年于河南理工大学获得博士学位,主要从事变形监测及微波遥感方面研究。E-mail: hero@hpu.edu.cn