



# 基于自适应多分辨率曲面的 多波束滤波方法研究

史书强<sup>1</sup>, 舒晓明<sup>2</sup>, 李 炜<sup>3</sup>

(1. 中交广州航道局有限公司, 广东 广州 510290; 2. 长江航道测量中心, 湖北 武汉 430010;

3. 广州点深软件有限公司, 广东 广州 511400)

**摘要:** 针对常规固定分辨率曲面滤波精度不足的问题, 提出一种基于自适应多分辨率曲面的多波束滤波方法。在地形变化较大的陡坎和细小目标突起物等测量环境下, 多分辨率曲面根据地形坡度变化, 对有特征地形或地物的局部区域, 自动增强多波束水深曲面的分辨率, 从而得到更精确的水底表面模型。基于该表面模型可进行自动滤波, 从而保留更加完整的水下地形特征和细小目标物, 并经过对比验证。结果表明, 在绝大部分的噪点都得到有效滤除条件下, 地形特征和细小目标物保留的完整率能够达到 98% 以上。构建的多分辨率曲面和滤波算法可有效提高多波束滤波精度。

**关键词:** 多波束测量; 自适应; 多分辨率; 点云; 自动滤波

中图分类号: P 229.1; U 612.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)01-0053-06

## Multi-beam filtering method based on adaptive multi-resolution surface

SHI Shu-qiang<sup>1</sup>, SHU Xiao-ming<sup>2</sup>, LI Wei<sup>3</sup>

(1.CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd., Guangzhou 510290, China; 2.Changjiang Waterway Bureau Survey Center, Wuhan 430010, China;

3.Guangzhou Depth Cloud Software Co., Ltd., Guangzhou 511400, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of insufficient filtering accuracy of common fixed resolution surface, we propose a multi-beam filtering method based on adaptive multi-resolution surface. In the survey condition of steep ridge and small target protrusion with the change of large terrain, the adaptive multi-resolution surface automatically enhances the resolution of multi-beam bathymetric surface for the local area with characteristic terrain or surface features according to the change of terrain slope, so as to obtain a more accurate seafloor surface model. Based on this surface model, automatic filtering can be carried out, so as to retain more complete underwater terrain feature and small target, and the method is compared and verified. The results show that under the condition that most of the noise is effectively filtered, the integrity rate of terrain features and small objects can reach more than 98%. The multi-resolution surface and filter algorithm built in this paper can improve the accuracy of multi-beam filtering.

**Keywords:** multi-beam survey; adaptive; multi-resolution; point cloud; automatic filtering

相比传统的单波束测量, 多波束声呐测深系统可以全覆盖获取高精度、高分辨率的海底地形点云数据, 在浅点扫测、目标物检测等海洋工程领域得到广泛应用。由于海洋施工环境恶劣, 铺排、抛石、疏浚、炸礁等对水下地形进行人为改造, 导致水底地形变化剧烈, 目标物体特征与多

波束噪点非常相似, 具有较大迷惑性。为了准确构建水下地形曲面, 国内相关学者相继提出趋势面拟合、CUBE (combined uncertainty and bathymetry estimator, 不确定性与测深学联合估值) 曲面、最优曲面等滤波方法。现有的曲面滤波方法包括基于最优参考曲面的多波束噪点自动剔除方法<sup>[1]</sup>、基

收稿日期: 2021-03-26

作者简介: 史书强(1988—), 男, 工程师, 从事海洋测绘、工程测量工作。

于最小二乘支持向量机算法构造海底趋势面的粗差剔除方法<sup>[2]</sup>、基于 CUBE 曲面进行粗差自动剔除方法<sup>[3]</sup>、多项式曲面函数拟合海底地形<sup>[4]</sup>等, 以上方法所构建的曲面均为固定分辨率曲面。当地形变化较大的情况下, 由于较深区域点云比较稀疏, 导致曲面上的各相邻节点不连续, 表现为水深点的离散化, 需要提高曲面分辨率; 而较浅区域点云比较稠密, 地形细节特征和小的目标物表现不明显, 需要降低曲面分辨率, 固定分辨率曲面显然难以较好地展现真实的水底地形曲面。本文在传统固定分辨率曲面的基础上, 提出一种根据水下地形变化构建自适应地形的多分辨率曲面方法, 在自动滤波的同时, 能更好地保留地形特征细节, 从而提高数据精度和质量。

1 方法研究

1.1 计算曲面的初始分辨率

假设测区多波束点云分布均匀, 测区面积为  $S$ , 多波束点云的点数为  $N$ , 每个格网包含的多波束点数为  $C$ , 那么曲面格网的初始分辨率  $L$  为:

$$L = \sqrt{\frac{SC}{N}} \tag{1}$$

从式(1)可以看出, 测区的多波束点云的点数  $N$  是已知量, 想要得到曲面格网初始分辨率, 就需要获得测区面积  $S$  和每个格网包含的多波束点数  $C$ , 可以通过将波束点云按照格网大小经验值进行格网化后, 统计格网面积和每个格网包含的点数确定, 然后经过迭代计算, 从而得到曲面格网的初始分辨率。

确定曲面的初始分辨率步骤为: 1) 先计算出多波束点云的平均水深值, 然后按照表 1 查询到对应的格网大小经验值, 作为多波束点云格网化统计的初始格网大小  $L_0$ 。2) 根据设定的格网大小  $L_i$ , 对多波束点云进行格网化, 统计包含多波束点的格网面积之和  $S_i = P_0 + P_1 + \cdots + P_n$ , 其中  $P_n = L_i \times L_i$ , 同时可以统计出每个格网包含的点数  $K_n$ , 然后统计出  $\min(K_0, K_1, \cdots, K_n)$  与  $\max(K_0, K_1, \cdots, K_n)$  之间占比最大的点数  $K_{\max}$ 。3) 设  $C_i = \lambda K_{\max}$ ,

其中  $\lambda$  为收敛常数, 将  $S_i$  和  $C_i$  代入式(1), 得到  $L'_i = \sqrt{\frac{S_i C_i}{n}}$ , 然后根据格网大小  $L'_i$ , 对多波束点云进行格网化, 采用步骤 2 同样的方法得到  $K'_{\max}$ 。4) 如果  $K'_{\max} > C_i$ , 那么  $L_i = L'_i$ , 重复步骤 2) 和 3), 否则  $L'_i$  即为最终求得的曲面格网初始分辨率。

表 1 格网大小经验值

平均水深范围/m	<20	20~<40	40~<100	100~<500
格网大小(经验值)/m	1	2	5	20

1.2 生成多分辨率曲面

在地形尺度变化较大情况下, 由于较深区域点云比较稀疏, 曲面上的各相邻节点不连续, 水深点表现为离散化, 需要提高曲面分辨率; 而较浅区域点云比较稠密, 地形细节特征和小的目标物表现不明显, 需要降低曲面分辨率。为了解决这个矛盾, 需要在曲面初始分辨率基础上, 对曲面格网进行局部细分(图 1), 从而让曲面表达的地形更加贴近真实地形(图 2)。

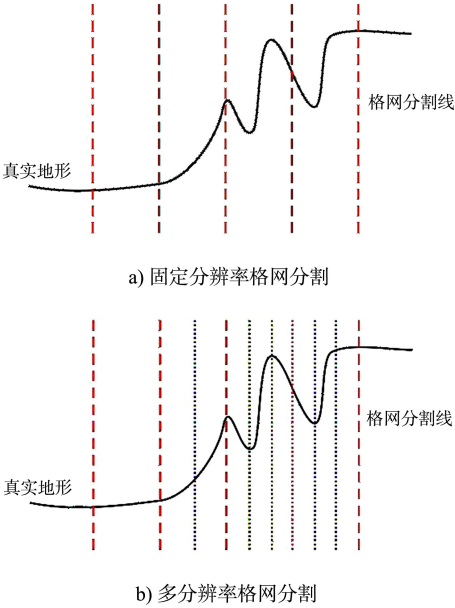
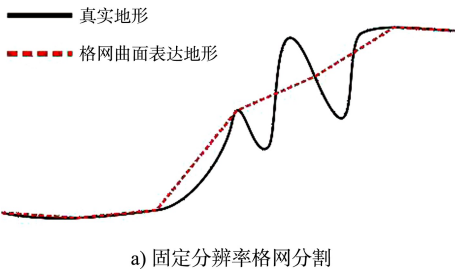


图 1 曲面格网细分



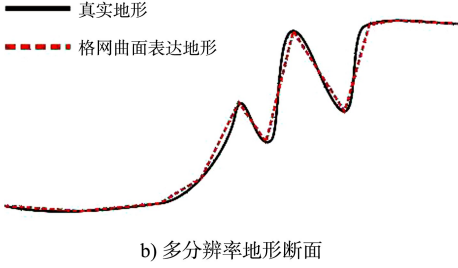


图 2 曲面断面细分对比

由图 1 可以看出, 地形变化越大, 格网需要分割越细, 才能使格网曲面表达地形更贴近真实地形, 而地形变化大小可以用每个格网内的波束点中误差衡量, 将初始分辨率格网经过  $N^2$  ( $N=2, 3, \dots$ ) 细化分割后, 每个细分子格网内的波束点中误差小于设定的阈值, 然后, 用  $N^2$  ( $N=2, 3, \dots$ ) 个细分子格网替代原有的父格网, 那么该格网分辨率从初始的  $L$  变为  $L/N$ , 从而形成多分辨率格网曲面。

生成多分辨率曲面的步骤为:

1) 根据初始格网大小  $L$ , 对多波束点云进行格网化, 统计每个格网  $i$  内多波束点的中误差  $Q_i$  和平均水深  $D_i$ , 并根据 IHO 规范<sup>[5]</sup>的精度指标要求, 计算出每个格网的水深精度参考值  $E_i$ :

$$E_i = \pm \sqrt{a^2 + (bD_i)^2} \quad (2)$$

式中:  $a$  为水深测量固定误差;  $b$  为水深测量比例误差。

2) 如果  $Q_i > E_i$ , 则需要将格网  $i$  进行细化分割, 设  $N$  为 2, 即将父格网  $i$  分割为 4 个子格网。

3) 将父格网分割为  $N^2$  个细分子格网后, 统计各个细分子格网  $j$  内多波束点的中误差  $Q_j$  和平均水深  $D_j$ , 并根据式 (2) 计算出细分子格网的水深精度参考值  $E_j$ 。

4) 如果  $Q_j > E_j$ , 则需要将子格网作为父格网进行  $N^2$  细化分割, 然后重复步骤 3), 进行格网迭代细化分割。

### 1.3 基于多分辨率曲面滤波

判断一个波束点  $P$  是否为噪点, 可以通过搜

索该  $P$  点半径  $R$  范围内的曲面格网节点, 见图 3, 基于这些格网节点推算  $P$  点的参考深度  $D'_p$ , 如果  $|D_p - D'_p| > E_p$ , 那么就判定为噪点并进行滤除, 其中  $D_p$  为波束点  $P$  的深度值,  $E_p$  为  $P$  点允许误差。

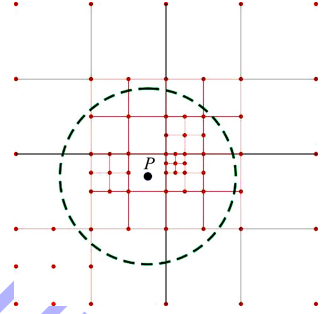


图 3 曲面格网节点

基于多分辨率曲面滤波的步骤为:

1) 以某一波束点  $P$  为中心, 在多分辨率曲面上搜索半径为  $R$  范围内的格网节点 ( $G_0, G_1, G_2, \dots, G_i$ )。

2) 建立卡尔曼滤波器的状态方程:

$$\begin{bmatrix} D_k \\ D_{v_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{k-1} \\ D_{v_{k-1}} \end{bmatrix} + Q_{k-1} \quad (3)$$

式中:  $k$  为卡尔曼滤波器的迭代次数;  $D_k$ 、 $D_{k-1}$  分别为迭代  $k$ 、 $k-1$  次的参考深度;  $D_{v_k}$ 、 $D_{v_{k-1}}$  分别为迭代  $k$ 、 $k-1$  次的深度变化率;  $Q_{k-1}$  为迭代  $k-1$  次状态方程的噪声矩阵;  $T$  为两次估计的时间间隔。

建立卡尔曼滤波器的观测方程为:

$$D_{\lambda_k} = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} D_k \\ D_{v_k} \end{bmatrix} + V_k \quad (4)$$

式中:  $D_{\lambda_k}$  为观测量;  $V_k$  为观测噪声量。

3) 将格网节点 ( $G_0, G_1, G_2, \dots, G_i$ ) 依次代入卡尔曼滤波器的状态方程和观测方程, 假设在对格网节点  $G_i$  进行异常检测时  $k$  取值为  $\delta$ , 则当对格网节点  $G_{i+1}$  进行处理时,  $k$  的取值为  $\delta+1$ , 从而准确估算出  $P$  点的参考深度  $D'_p$ 。

4) 计算出格网节点 ( $G_0, G_1, G_2, \dots, G_i$ ) 的平均深度  $D_{\text{avg}}$  代入式 (2), 得到  $P$  点水深精度参考值

$E_p = \pm \sqrt{a^2 + (bD_{avg})^2}$ 。设波束点  $P$  的深度值为  $D_p$ ，如果  $|D_p - D'_p| > E_p$ ，那么就判定波束点  $P$  为噪点并进行滤除。

2 试验验证与分析

在地形变化较大的陡坎和较小目标突起物等环境下，多分辨率曲面根据地形坡度变化，对有特征地形或地物的局部区域进行分辨率增强，从而得到更精确的水底表面模型，相较于固定分辨率曲面滤波，多分辨率曲面滤波可以保留更完整的水下地形特征和细小目标物。

2.1 陡坎地形

由于陡坎地形水深变化幅度很大，如果采用固定分辨率格网曲面滤波，估算的参考深度存在较大计算误差，斜坡上的部分真实的数据点被误删，导致斜坡地形不连续，存在地形漏缺现象，如图 4a) 所示。本文的多分辨率曲面有效解决了这一问题，根据陡坎的坡度，对陡坎进行局部分辨率增强，提高参考深度的估算精度，有效避免陡坎上的真实地形点被误删，从而使陡坎地形更加连续，采用多分辨率曲面滤波后的效果如图 4b) 所示。

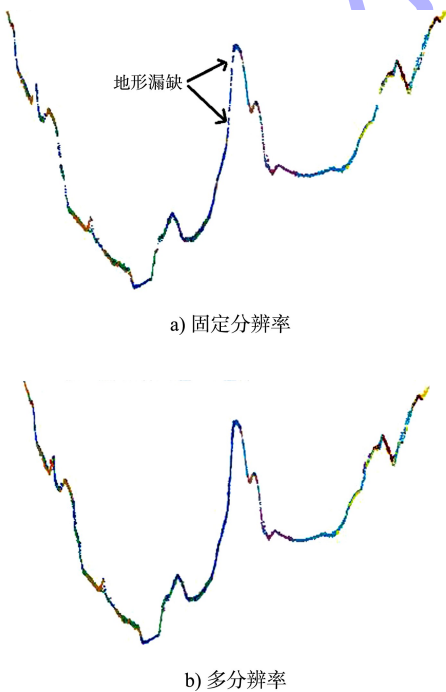


图 4 陡坎地形固定分辨率与多分辨率曲面滤波效果

2.2 细小目标

多波束点云数据通常包含多个离散的一小撮噪点，与细小目标表现的特征极为相似，在将噪点从地形中剔除的同时，如何有效保留细小目标成为曲面滤波效果的关键评价指标。

图 5 的细小目标所处深度为 28 m，细小目标的最细直径为 0.2 m，长宽比约为 2.3，属于典型的细小目标突起特征地形，在该细小目标特征地形周围还分布着多个小撮噪点。

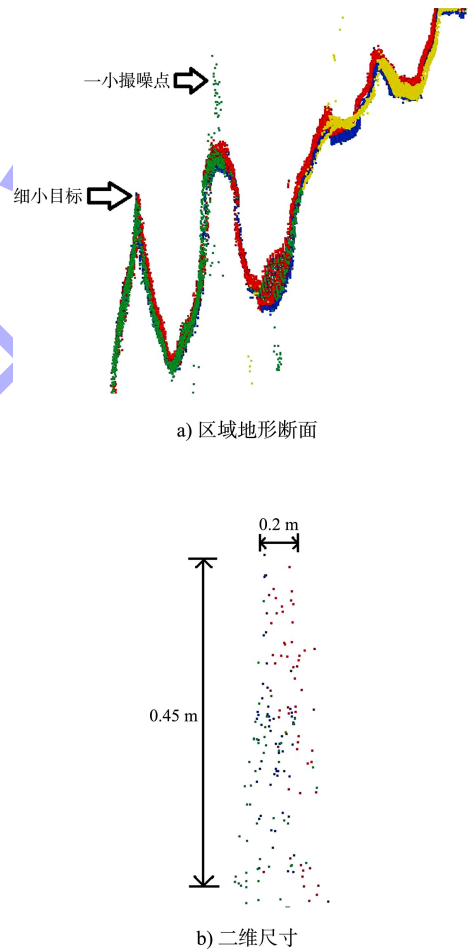


图 5 细小目标

先采用固定分辨率曲面滤波方式，创建一个分辨率为 1 m 的格网曲面，按照 IHO S-44 特级精度标准进行曲面滤波后的效果如图 6a) 所示，虽然噪点得到清除，但是圆圈处的细小目标特征地形也被当作噪点删除。然后，采用本文所论述的多分辨率曲面滤波方式，创建一个初始分辨率为 1 m 的多分辨率曲面，同样按照 IHO S-44 特级精度标



准进行曲面滤波, 滤波后的效果如图 6b) 所示, 在噪点得到有效清理条件下, 圆圈处的细小目标特征地形得到完整保留。

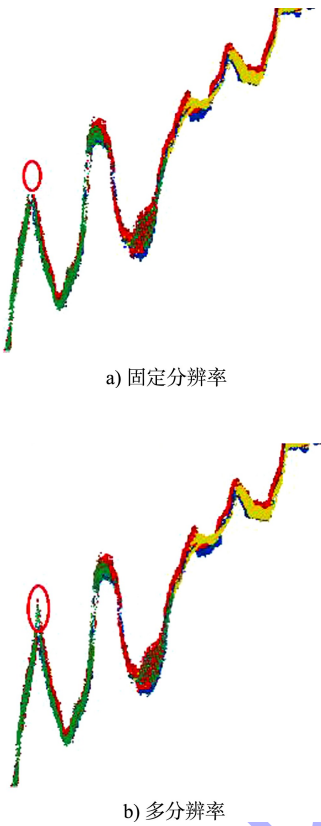


图 6 细小目标固定分辨率与多分辨率曲面滤波效果

2.3 特殊障碍物

沉船、斜插的钢条和钢板等特殊障碍物导致地形突变, 在剔除掉噪点的同时, 能够保留障碍物清晰的轮廓尤为关键。为了验证本滤波算法对特殊障碍物的滤波效果, 选取一个水下预制板(长 7 m、宽 1.5 m)的扫测数据, 在多波束测量原始点云中, 该预制板非常突兀, 周围地形起伏变化很复杂, 而且存在较多噪点。

采用本文的多分辨率曲面滤波方式, 创建一个初始分辨率为 0.75 m 的多分辨率曲面, 然后按照 IHO S-44 特级精度标准进行曲面滤波, 滤波后的效果如图 7 所示, 在噪点得到有效清理条件下, 预制板的轮廓更加清晰, 从而验证了本滤波方法对水下障碍物轮廓保留的完整性。

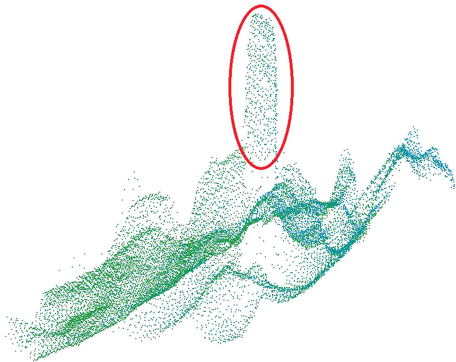


图 7 多分辨率曲面滤波后的水下预制板三维点云

2.4 疏浚施工

在某航道工程中, 采用大型耙吸船进行疏浚开挖施工, 在初期施工阶段, 受耙头开挖作用力的影响, 海底地形会出现高差 1~3 m 的“垄沟”。采用该方法对多波束测量数据进行自动滤波, 得到滤波后的断面如图 8 所示。可以看出, 该自动滤波方法能够较好的剔除噪点数据, 同时保留了真实的地形特征点, 自动滤波效果较好。

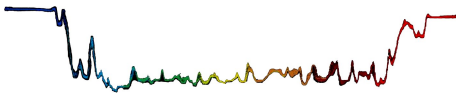


图 8 多分辨率曲面滤波后的航道断面

将自动滤波得到的成果数据, 与人工精细化处理后的数据进行对比分析, 按照 1 m 的搜索半径进行重合点比对。通过计算分析可知: 重合点数量为 27 455 对, 重合点水深差值的平均值为 0.008 m, 标准差为 0.092 m, 差值在 -0.4~0.4 m 之间的水深点比例为 99.2%, 满足《水运工程测量规范》<sup>[6]</sup>的限差要求, 自动滤波的成果数据可以用于指导船舶疏浚施工作业。

3 结语

1) 针对陡坎地形、细小目标、特殊障碍物等复杂水下地形, 多分辨率曲面能够清晰、完整地展示海底地形变化趋势。

2) 将构建的多分辨率水深曲面作为基准曲面, 采用卡尔曼滤波对多波束水深测量的点云数据进行滤波处理, 计算结果表明, 该曲面模型真实可靠、自动滤波算法合理, 能够满足《水运工程测量规范》、IHO 规范水深测量的精度要求。

3) 本文的滤波算法基于多分辨率的水深曲面, 因此在测量过程中, 应确保测量区域内多波束测量全覆盖、无空洞, 保证水深曲面完整性和自动滤波精度。

4) 本文提出的滤波方法, 在多波束水深测量自动滤波中效果较好, 可为水运工程施工提供快速、精度可靠的水深测量数据, 具有较强的实用性。

参考文献:

[1] 戴红伟, 严怀志, 李炜. 基于最优参考曲面的多波束自

(本文编辑 王璁)

(上接第 34 页)

[6] 李谊纯. 一个潮流不对称计算方法及其在北仑河口的应用[J]. 海洋工程, 2014, 32(4): 110-116.

[7] GONG W P, SCHUTTELAARS H, ZHANG H. Tidal asymmetry in a funnel-shaped estuary with mixed semidiurnal tides[J]. Ocean dynamics, 2016, 66(5): 637-658.

[8] LUO X L, ZENG E Y, JI R Y, et al. Effects of in-channel sand excavation on the hydrology of the Pearl River delta China[J]. Journal of hydrology, 2007, 343(3): 230-239.

[9] LU X X, ZHANG S R, XIE S P, et al. Rapid channel incision of the lower pearl river since the 1990s as a consequence of sediment depletion[J]. Hydrology & earth system sciences discussions, 2007, 85(11): 1897-1906.

[10] ZHANG W, CAO Y, ZHU Y L, et al. Unravelling the causes of tidal asymmetry in deltas[J]. Journal of hydrology,

动滤波方法研究[J]. 航海, 2020(5): 52-56.

[2] 黄贤源, 翟国君, 隋立芬, 等. LS-SVM 算法中优化训练样本对测深异常值剔除的影响[J]. 测绘学报, 2011, 40(1): 22-27.

[3] 黄辰虎, 陆秀平, 侯世喜, 等. 利用 CUBE 算法剔除多波束测深粗差研究[J]. 海洋测绘, 2010, 30(3): 1-5.

[4] 董江, 任立生. 基于趋势面的多波束测深数据滤波方法[J]. 海洋测绘, 2007(6): 25-28.

[5] International Hydrographic Organization. IHO standards for hydrographic surveys [S]. 5th ed. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008.

[6] 中交天津航道局有限公司, 中交天津港航勘察设计研究院有限公司. 水运工程测量规范: JTS 131—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

2018, 564: 588-604.

[11] 王宗旭, 乔煜, 季小梅, 等. 珠江河口岸线变化对潮动力的影响[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(3): 1171-1180.

[12] MATTE P, JAY D A, ZARON E D. Adaptation of classical tidal harmonic analysis to nonstationary tides, with application to river tides[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2013, 30(3): 569-589.

[13] MATTE P, SECRETAN Y, MORIN J. Temporal and spatial variability of tidal-fluvial dynamics in the St. Lawrence fluvial estuary: An application of nonstationary tidal harmonic analysis[J]. Journal of geophysical research-oceans, 2014, 119(9): 5724-5744.

(本文编辑 武亚庆)