

引入RTOD的偏移量追踪小基线集跃动冰川流速监测方法

师悦龄^{1,2,3}, 车涛⁴, 王晓文⁵, 刘国祥⁵,
毛文飞⁵, 魏辰辰¹, 张志华^{1,2,3}

1. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院, 兰州 730070;
2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 兰州 730070;
3. 甘肃省测绘科学与技术重点实验室, 兰州 730070;
4. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000;
5. 西南交通大学 地球科学与工程学院测绘遥感信息系, 成都 611756

摘要: 本文针对传统偏移量追踪小基线集方法在跃动冰川三维时序流速监测中受异常值干扰严重的问题, 提出一种引入稳健趋势-异常值分解RTOD (Robust Trend-Outlier Decomposition) 的信号处理方法, 以提升流速时间序列的可靠性与准确性。将RTOD方法集成至传统的星载合成孔径雷达SAR (Synthetic Aperture Radar) 偏移量追踪多维小基线集PO-MSBAS (Pixel-Offset-tracking Multi-dimensional Small Baseline Subset) 和三维偏移量追踪小基线集3D PO-SBAS (three-dimensional Pixel-Offset-tracking Small-Baseline-Subset) 方法中, 分别构建RTOD-PO-MSBAS和RTOD-3D-POSBAS算法。该方法通过对升/降轨Sentinel-1A/B SAR影像提取的位移或流速时间序列进行信号分解, 识别并剔除异常值, 重建冰面三维时序流速。本文以斯瓦尔巴群岛奥斯本 (Osbornebreen) 冰川为实验区进行测试, 结果表明, RTOD处理显著抑制了流速异常值, 提升了Sentinel-1A/B SAR影像与Sentinel-2光学影像提取流速的一致性。西支冰川Sentinel-1A/B SAR影像与Sentinel-2A/B光学影像提取流速的相关系数由0.03—0.77提升至0.15—0.98, 流速间差值的四分位距由35.45—717.26降至33.59—142.42; 东支冰川相关系数由0.01—0.27提升至0.47—0.80, 四分位距由140.07—3056.97降至40.70—113.62。再者, 对比发现, RTOD-PO-MSBAS和RTOD-3D-POSBAS解算的各年份流速曲线与全球陆地冰流速与高程时间序列数据集ITS_LIVE (inter-mission time series of land ice velocity and elevation) 流速产品间亦具有较好的一致性, 相较传统算法能够更为准确地刻画奥斯本冰川流速时空变化特征。总体而言, RTOD方法对跃动冰川时序流速的异常值剔除效果较好, 有效提升了跃动冰川三维时序流速监测的可靠性, 为跃动冰川运动过程研究提供了更高质量的数据支持。该方法也为其他类型的大量级地表位移监测 (如滑坡、泥石流等) 提供了技术参考。

关键词: 跃动冰川, 冰川三维时序流速, 稳健趋势-异常值分解, PO-MSBAS, 3D PO-SBAS, 奥斯本冰川, 斯瓦尔巴群岛

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 师悦龄, 车涛, 王晓文, 刘国祥, 毛文飞, 魏辰辰, 张志华. 2026. 引入RTOD的偏移量追踪小基线集跃动冰川流速监测方法. 遥感学报, 30(7): 2134-2155

Shi Y L, Che T, Wang X W, Liu G X, Mao W F, Wei C C and Zhang Z H. 2026. Monitoring surge-type glacier velocities using Pixel Offset Tracking Small Baseline Subset method with Robust Trend-Outlier Decomposition. National Remote Sensing Bulletin, 30(7): 2134-2155 [DOI:10.11834/jrs.20265344]

收稿日期: 2025-09-11; 预印本: 2026-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(编号:U22A20565, 42406254, 42401535); 甘肃省科技计划(编号:23ZDKA0004); 甘肃省青年科技基金(编号:24JRRA271); 兰州交通大学“天佑青年托举人才计划”项目

第一作者简介: 师悦龄, 研究方向为冰川遥感。E-mail: shiyueling@mail.lzjtu.cn

通信作者简介: 车涛, 研究方向为冰冻圈遥感。E-mail: chetao@lzb.ac.cn

1 引言

冰川跃动是冰川运动的一种特殊形式, 指冰川周期性地在相对较短的时间内(持续时间通常为数月至数年)发生快速运动的冰川活动现象(Meier和Post, 1969; 秦大河等, 2016; Raymond, 1987)。跃动期, 冰川流速急剧加快, 冰川物质快速转移和重新分布, 冰川前缘快速向前推进; 平静期, 流速逐渐恢复常态, 冰川下游壅积冰体因消融而不断减薄, 冰舌末端逐渐后退, 上游雪冰重新累积。

冰川流速急剧加快是冰川跃动的关键特征, 冰川在跃动期运动速度可达平静期的数倍甚至上百倍。由于跃动期的开始时间、演化模式和持续时间与冰川动力学过程有关, 精细化的冰川流速监测对分析探究冰川跃动具有非常重要的意义(Benn等, 2019; 郭万钦等, 2022; Sevestre和Benn, 2015)。传统的冰川流速监测手段主要有实地观测和光学卫星遥感观测。前者主要利用全球定位系统GPS(Global Positioning System)(艾松涛等, 2012; Błaszczyk等, 2021)和无人机(Jouvet等, 2017)进行监测。GPS和无人机监测手段的优点是测量精度高, 但存在难到达、观测条件要求高、监测范围受限等问题。光学卫星遥感观测手段能实现大范围冰川流速监测, 但面临云雾遮挡的问题(李荣兴等, 2022; Nolan等, 2021)。近年来, 以全球陆地冰流速与高程时间序列数据集ITS_LIVE(Inter-mission Time Series of Land Ice Velocity and Elevation)为代表的大范围冰川流速数据集(Gardner等, 2025), 结合以TICOI(Temporal Inversion using linear Combinations of Observations, and Interpolation)算法为代表的高时间分辨率重建方法(Charrier等, 2025), 为开展冰川流速的长时序监测提供了重要的数据与方法支撑, 但跃动冰川因其流速变化的非线性与复杂性, 其时空演变特征的精细化分析仍有较大的拓展空间。

星载合成孔径雷达SAR(Synthetic Aperture Radar)技术具有大范围全天时全天候成像、重访周期短、不受云雾天气影响等技术优势, 有效弥补了传统手段的缺陷(Friedl等, 2021; Van Wychen等, 2023)。以三维偏移量追踪小基线集3D PO-SBAS(three-dimensional pixel-offset-tracking small-baseline-subset)方法(Li等, 2018; Yang等, 2020)和偏移量追踪多维小基线集PO-MSBAS(pixel-

offset-tracking multi-dimensional small baseline subset)方法(Guo等, 2020; Samsonov等, 2021)为代表的星载SAR冰川流速时序处理技术, 推动冰川流速研究向长时序、高时间分辨率、三维监测的方向发展, 为精细化揭示跃动冰川流速时空变化规律、探究冰川跃动演化过程提供了关键技术支撑。

然而, 尽管3D PO-SBAS与PO-MSBAS等长时序三维流速解算方法显著提升了冰川流速的连续监测能力, 其提取结果的可靠性仍高度依赖于算法核心——偏移量追踪POT(Pixel Offset Tracking)技术。换言之, 最终解算出的冰川流速场的精度与准确性, 本质上取决于POT技术基于SAR影像强度互相关或特征匹配所构建的冰面位移场的质量。然而, 随着对冰川运动与表面形变机制的深入研究, 传统基于强度或特征匹配的POT技术在捕捉冰川复杂形变特征方面的局限日益显现。尤其在冰川发生跃动等极端事件时, 冰面往往伴随三维方向上的非均匀变形, 如冰裂隙扩张、收缩或扭曲, 这与POT技术假设搜索窗口内所有像点位移方向一致的前提相悖, 导致传统POT技术在处理此类复杂形变时表现不佳, 易使流速场中出现异常值, 进而制约了对跃动冰川流速时空变化特征的准确解析与深入理解。

显然, 面向跃动冰川这种特殊的冰川运动形式, 解决当前基于3D PO-SBAS或PO-MSBAS算法解算出的跃动冰川流速易受异常值影响的问题, 对精细化重建跃动冰川流速变化特征、准确分析和解译其时空演变过程及规律, 以及揭示冰川跃动特征及触发机制, 具有十分重要的研究意义。针对上述问题, 本文提出一种稳健趋势-异常值分解RTOD(Robust Trend-Outlier Decomposition)的信号处理方法, 并将其引入传统PO-MSBAS与3D PO-SBAS流程中, 分别构建RTOD-PO-MSBAS与RTOD-3D-POSBAS算法, 以识别和剔除传统算法构建的冰川流速时间序列中的异常值。该方法首先对原始信号进行分解, 提取其稳健趋势成分; 在此基础上, 通过分析残差序列中统计意义上的极端值, 判定和剔除异常值分量。本文以斯瓦尔巴群岛斯匹次卑尔根岛的奥斯本(Osbornebreen)冰川(全球陆地冰空间观测计划GLIMS(Global Land Ice Measurements from Space), ID: G013139E78668N)为实验对象, 对所提出的RTOD-PO-MSBAS与RTOD-3D-POSBAS算法在跃动冰川三维时序流速监测中

的可靠性与有效性进行验证。

2 研究方法

2.1 节详细介绍了本文提出的 RTOD 信号分解算法的原理。2.2 节和 2.3 节分别介绍如何将 RTOD 算法集成至传统的 PO-MSBAS 与 3D PO-SBAS 方法中, 以解算剔除异常值后的冰面三维流速时间序列。

2.1 RTOD 算法原理

RTOD 算法旨在将观测到的时间序列分解为 3 个分量: 趋势分量、异常值分量和残差分量。其数学模型可表示为

$$X_t = T_t + O_t + E_t, \forall t \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

式中, X_t 为原始信号在时间点 t 上的观测值, T_t 为时间点 t 上的趋势分量估计值, O_t 为时间点 t 上的

异常值分量估计值, E_t 为时间点 t 上的残差分量估计值, n 为时间序列总长度。

算法的数学过程可表述为以下 4 个核心步骤, 如图 1 所示。首先, 进行趋势分量提取。趋势分量通过一个自适应窗口的简单移动平均进行初始估计, 旨在捕获时序数据的长期运动趋势。其计算公式为

$$T_t = \frac{1}{|W_t|} \sum_{i \in W_t} X_i \quad (2)$$

式中, W_t 为以时间点 t 为中心的自适应窗口, 公式为

$$W_t = \{i \in Z | \max(1, t-h) \leq i \leq \min(n, t+h)\} \quad (3)$$

式中, i 代表时间点索引, 其值为整数; Z 表示整数集; h 为窗宽 w 的一半, 窗宽公式为

$$w = \max(7, \lceil n/20 \rceil) \quad (4)$$

式中, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整, 7 和 20 可通过调试获得。

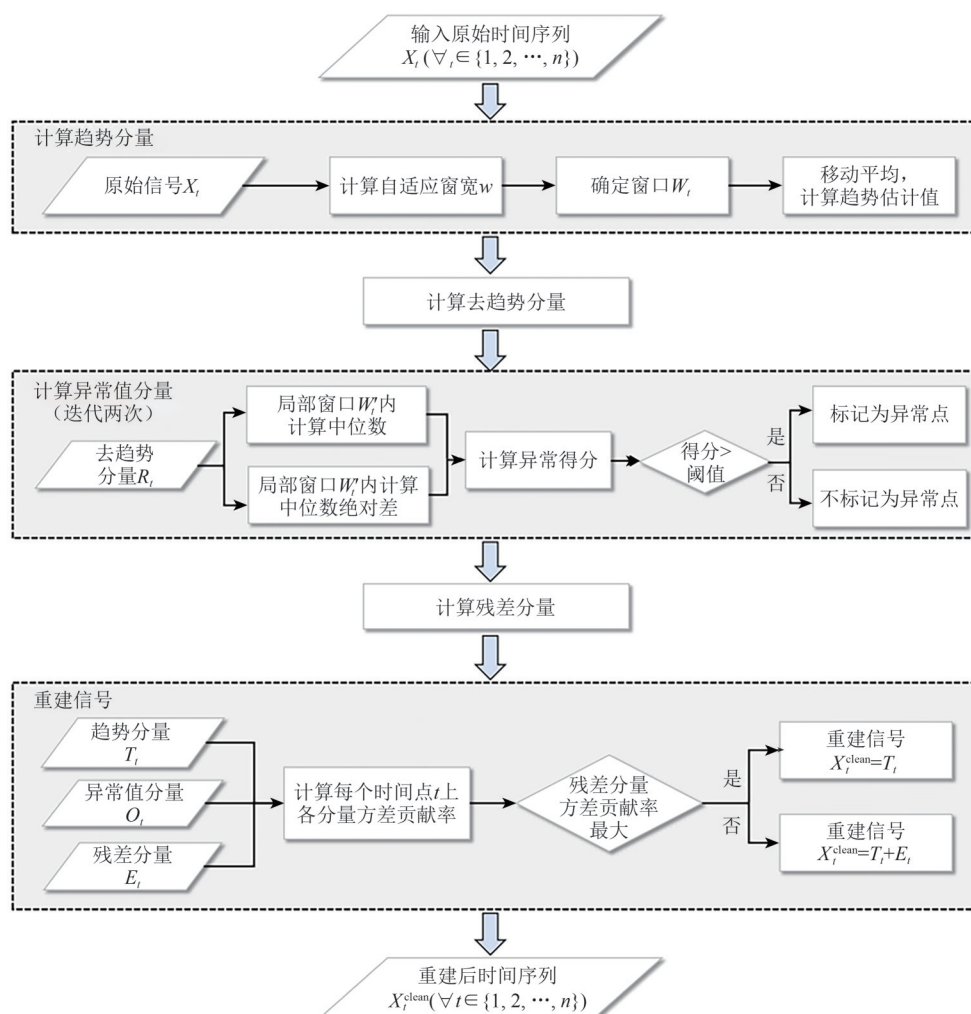


图1 RTOD算法技术流程

Fig. 1 Flowchart of the RTOD algorithm

然后, 进行异常值检测, 这是 RTOD 算法的关键。异常值在去趋势分量后的时间序列 $R_t = X_t -$

$T_t (\forall t \in \{1, 2, \dots, n\})$ 上进行检测。算法在其上执行一个两轮迭代的异常检测流程。其核心思想是

计算每个点相对于其局部邻域的标准化得分, 并与阈值进行比较, 得分高于阈值的被判定为异常点。具体做法是, 对于每个时间点 t , 在其局部窗口 W'_t 内 (排除自身及已识别的异常点), 分别计算样本中位数和中位数绝对差两种统计量:

$$M_t = \text{median}(\{R_t | t \in W'_t\}) \quad (5)$$

$$\text{MAD}_t = 1.4826 \times \text{median}(\{|R_t - M_t| | t \in W'_t\}) \quad (6)$$

式中, M_t 表示局部窗口 W'_t 内的样本中位数; R_t 表示去趋势后的时间序列在时间点 t 的值; MAD_t 表示中位数绝对差, 是序列离散程度的统计量; 常数 1.4826 使得对于正态分布数据; MAD_t 是标准差的一致估计量。需要指出的是, W'_t 不同于 W_t , W_t 是面向原始时间序列设置的, 此时尚未进行异常值检测, 窗口内既包含 X_t , 也可能包含异常点, 而 W'_t 面向的是剔除趋势分量后的时间序列, 窗口内不包含 X_t , 第一次迭代时可能包含异常点, 第二次迭代会排除已在第一次迭代中发现的异常点。在计算上述两种统计量的基础上, 计算两种异常得分, 公式为

$$S_t^{\text{MAD}} = \frac{|R_t - M_t|}{\text{MAD}_t + \varepsilon} \quad (7)$$

$$S_t^Z = \frac{|R_t - M_t|}{(\text{MAD}_t / 1.4826) + \varepsilon} \quad (8)$$

式中, S_t^{MAD} 和 S_t^Z 表示时间点 t 上的两种异常得分; ε 表示一个极小的正数 (如 10^{-6}), 用于防止分母为零。若任一得分超过预设阈值 γ (本文设置为 3.5), 即 $S_t^{\text{MAD}} > \gamma$ 或 $S_t^Z > \gamma$, 则将时间点 t 标记为异常点。

最后, 进行残差计算与信号重建。残差分量 (E_t) 通过从原始信号中剔除已估计的趋势和异常值成分得到, 公式为

$$E_t = X_t - T_t - O_t (\forall t \in \{1, 2, \dots, n\}) \quad (9)$$

式中, T_t 为时间点 t 上的趋势分量估计值; O_t 为时间点 t 上的异常值分量估计值。

在重建信号时, 算法引入一个基于方差的决策规则。首先计算各分量的方差贡献率, 如式 (10) 所示。若残差分量的方差贡献率 V_E 最大, 表明时间序列为噪声主导, 此时重建信号摒弃残差分量, 只保留趋势信号分量; 反之, 则保留趋势和残差分量共同构成重建信号, 如式 (11) 所示。

$$V_c = \frac{\text{Var}(C)}{\text{Var}(X)}, \text{ 其中 } C \in \{T, O, E\} \quad (10)$$

$$X_t^{\text{clean}} = \begin{cases} T_t, & V_E = \max(V_T, V_O, V_E) \\ T_t + E_t, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中, V_c 表示成分 C 的方差相对于原始序列方差的贡献比率, X 表示原始序列, T 为趋势分量、 O 为异常值分量, E 为残差分量, X_t^{clean} 表示重建信号, V_T 、 V_O 、 V_E 分别表示趋势分量、异常值分量和残差分量的方差贡献率。

2.2 RTOD-PO-MSBAS 方法

传统的 PO-MSBAS 算法主要包括以下 3 个步骤: (1) 设置时间基线, 构建升/降轨影像小基线集; (2) 利用 POT 技术提取升/降轨每个影像对在方位向 AZ (azimuth) 和视线向 LOS (Line of Sight) 上的位移量; (3) 构建式 (12) 所示的大型矩阵, 联合升/降轨 SAR 影像 LOS 和方位向 POT 观测值, 逐点解算矩阵, 最终得到冰川表面三维 (东西向、南北向、垂直向) 流速时间序列。

$$\begin{bmatrix} S_N^{\text{A(LOS)}} \Delta t_i^{\text{A}} & S_E^{\text{A(LOS)}} \Delta t_i^{\text{A}} & S_U^{\text{A(LOS)}} \Delta t_i^{\text{A}} \\ S_N^{\text{A(AZ)}} \Delta t_i^{\text{A}} & S_E^{\text{A(AZ)}} \Delta t_i^{\text{A}} & S_U^{\text{A(AZ)}} \Delta t_i^{\text{A}} \\ S_N^{\text{D(LOS)}} \Delta t_i^{\text{D}} & S_E^{\text{D(LOS)}} \Delta t_i^{\text{D}} & S_U^{\text{D(LOS)}} \Delta t_i^{\text{D}} \\ S_N^{\text{D(AZ)}} \Delta t_i^{\text{D}} & S_E^{\text{D(AZ)}} \Delta t_i^{\text{D}} & S_U^{\text{D(AZ)}} \Delta t_i^{\text{D}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_N^i \\ V_E^i \\ V_U^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{k_1, \text{LOS}}^{\text{A}} \\ d_{k_1, \text{AZ}}^{\text{A}} \\ d_{k_2, \text{LOS}}^{\text{D}} \\ d_{k_2, \text{AZ}}^{\text{D}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, $S_N^{\text{A(LOS)}}$ 和 $S_N^{\text{D(LOS)}}$ 分别代表升/降轨影像解算的 LOS 偏移量在南北向上的投影系数, $S_N^{\text{A(AZ)}}$ 和 $S_N^{\text{D(AZ)}}$ 分别代表升/降轨影像解算的方位向偏移量在南北向上的投影系数。其余投影系数定义同理, 不同之处在于下标 E 表示东西向, U 表示垂直向。上述各投影系数由升/降轨影像的侧视角 (LOS 向与垂直方向间夹角) 和方位角 (卫星飞行方向与正北方向间顺时针夹角) 计算得出。 Δt_i^{A} 和 Δt_i^{D} 分别代表升/降轨第 i ($1 \leq i \leq N_1 + N_2 - 3$) 个时段的时间间隔; V_N^i 、 V_E^i 、 V_U^i 分别代表第 i 个时段南北向、东西向、垂直向冰川流速; $d_{k_1, \text{LOS}}^{\text{A}}$ 和 $d_{k_1, \text{AZ}}^{\text{A}}$ 分别代表升轨 k_1 ($1 \leq k_1 \leq N_1 - 1$) 时段内 LOS 和方位向偏移量, $d_{k_2, \text{LOS}}^{\text{D}}$ 和 $d_{k_2, \text{AZ}}^{\text{D}}$ 分别代表降轨 k_2 ($1 \leq k_2 \leq N_2 - 1$) 时段内 LOS 和方位向偏移量。其中, N_1 为升轨 SAR 影像的数量, N_2 为降轨 SAR 影像的数量。

需要说明的是, 由于冰川在跃动期间流速极快, 考虑到 POT 技术对冰面同名特征点匹配的敏感性, 特别是快速运动可能导致长时间间隔影像间的同名点识别困难, 本文将时间基线阈值设置为与 SAR 影像集的时间分辨率一致。因此, 基于上述参数设置, 升轨构建包含 $N_1 - 1$ 个时间段

的LOS/AZ冰面位移量时间序列, 降轨构建包含 $N_2 - 1$ 个时间段的LOS/AZ冰面位移量时间序列。此外, 传统PO-MSBAS方法在构建如式(12)所示的稀疏矩阵时要求升轨和降轨的时间跨度保持一致。因此, 需要将升轨和降轨中主影像开始时间最早的一个像对和副影像结束时间最晚的一个像对的时间间隔进行比例缩放, 使其与最早开始时间之后的第一个时刻和最晚结束时间之前的第一个时刻对齐。故而PO-MSBAS方法解算出的流速时间序列, 时间点的数量为 $N_1 + N_2 - 2$, 时间段的总数量为 $N_1 + N_2 - 3$ 。

RTOD-PO-MSBAS算法则包括4个步骤, 如图2所示。前两个步骤与传统PO-MSBAS算法相

同, 但在构建如式(12)所示的稀疏矩阵前, 引入RTOD算法对经POT处理后得到的升轨LOS/AZ冰面位移量时间序列和降轨LOS/AZ冰面位移量时间序列做信号分解处理, 剔除异常值对位移量时间序列的影响, 分别得到重建后升轨LOS/AZ位移量 $d_{k_1, \text{LOS_clean}}^A$ 和 $d_{k_1, \text{AZ_clean}}^A$, 以及重建后降轨LOS/AZ位移量 $d_{k_2, \text{LOS_clean}}^D$ 和 $d_{k_2, \text{AZ_clean}}^D$, 其中 k_1 和 k_2 的取值范围同式(12)。在此基础上, 最终一步构建如式(13)所示的稀疏矩阵, 求解剔除异常值后的三维时序流速结果 $V_{N_clean}^i$ 、 $V_{E_clean}^i$ 、 $V_{U_clean}^i$ 。式(12)和式(13)中的系数矩阵为大型稀疏矩阵, 针对稀疏矩阵病态的问题, 采用Tikhonov正则化约束求解。

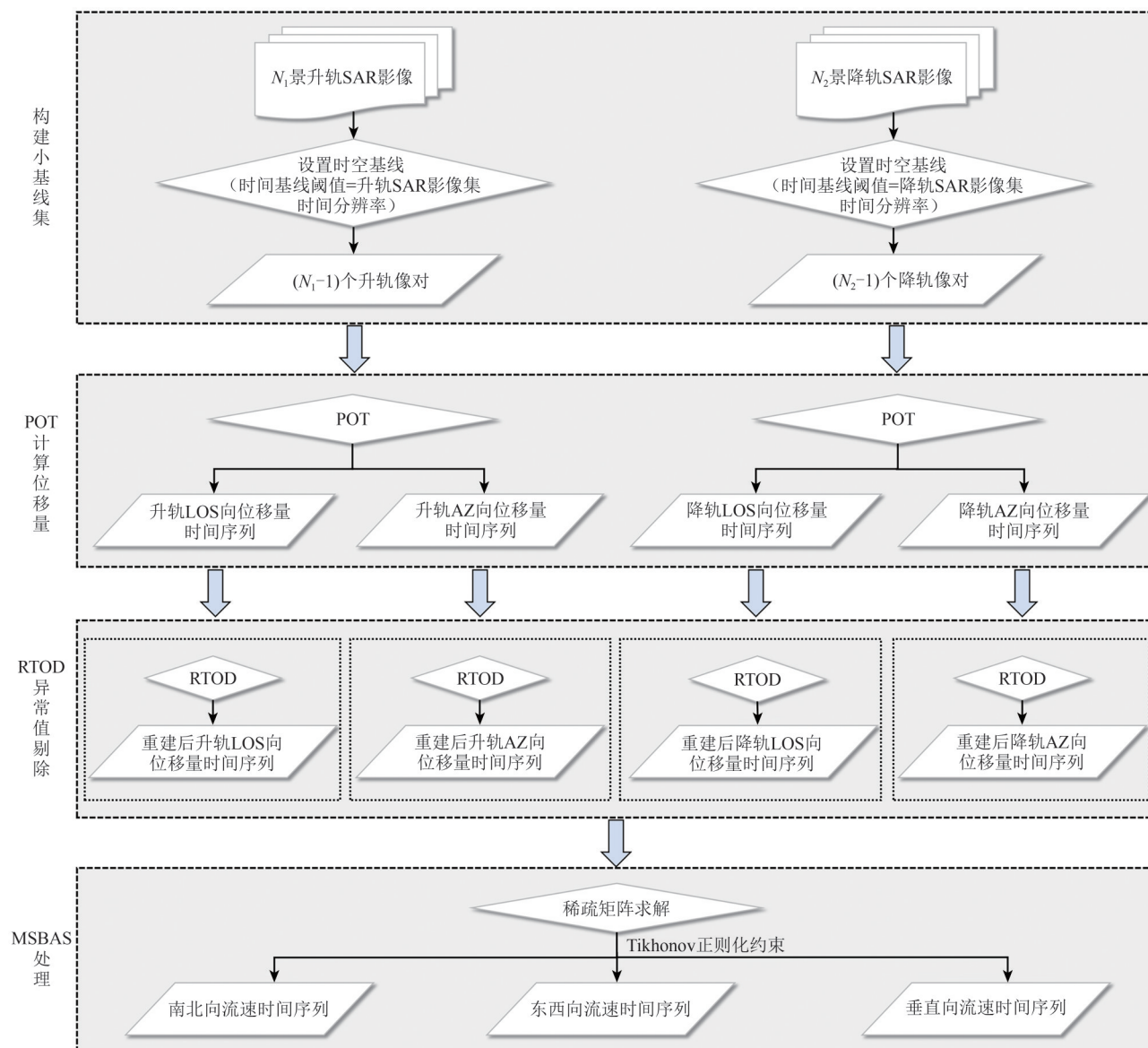


图2 RTOD-PO-MSBAS算法流程

Fig. 2 Flowchart of the RTOD-PO-MSBAS algorithm

$$\begin{bmatrix} S_N^{A(LOS)} \Delta t_i^A & S_E^{A(LOS)} \Delta t_i^A & S_U^{A(LOS)} \Delta t_i^A \\ S_N^{A(AZ)} \Delta t_i^A & S_E^{A(AZ)} \Delta t_i^A & S_U^{A(AZ)} \Delta t_i^A \\ S_N^{D(LOS)} \Delta t_i^D & S_E^{D(LOS)} \Delta t_i^D & S_U^{D(LOS)} \Delta t_i^D \\ S_N^{D(AZ)} \Delta t_i^D & S_E^{D(AZ)} \Delta t_i^D & S_U^{D(AZ)} \Delta t_i^D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{N_clean}^i \\ V_{E_clean}^i \\ V_{U_clean}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{k_1, LOS_clean}^A \\ d_{k_1, AZ_clean}^A \\ d_{k_2, LOS_clean}^D \\ d_{k_2, AZ_clean}^D \end{bmatrix} \quad (13)$$

2.3 RTOD-3D-POSBAS方法

传统3D PO-SBAS方法提取冰川三维时序流速的技术流程主要包括影像对组合、POT处理、SBAS

$$\begin{bmatrix} V_{i, LOS}^A \\ V_{i, AZ}^A \\ V_{i, LOS}^D \\ V_{i, AZ}^D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \theta_A & \sin \theta_A \cos \alpha_A & -\sin \theta_A \sin \alpha_A \\ 0 & \sin \alpha_A & \cos \alpha_A \\ -\cos \theta_D & -\sin \theta_D \cos \alpha_D & -\sin \theta_D \sin \alpha_D \\ 0 & \sin \alpha_D & \cos \alpha_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_U^i \\ V_E^i \\ V_N^i \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, $V_{i, LOS}^A$ 和 $V_{i, AZ}^A$ 分别为升轨第 i 个时段的 LOS 和 AZ 流速, $V_{i, LOS}^D$ 和 $V_{i, AZ}^D$ 分别为降轨第 i 个时段的 LOS 和 AZ 流速, 均由 SBAS 计算获得; α_A 表示升轨方位角, θ_A 为升轨侧视角, α_D 和 θ_D 分别为降轨方位角和侧视角; V_U^i 、 V_E^i 、 V_N^i 分别为第 i 个时段的東西向、南北向、垂直向冰面流速。需要指出的是, 由于升/降轨影像对涵盖的时间段不同, 所生成的升/降轨流速时间序列在时间轴上并未重合。因此, 在解算三维流速之前, 需要对覆盖不同时间段的升/降轨 LOS 和 AZ 流速时间序列进行处理, 使二者时间

处理及三维流速场解算4个处理步骤。首先, 按照设定的时空基线阈值, 对升/降轨 SAR 影像进行组合, 形成若干个像对; 然后, 对每个升/降轨像对做 POT 处理, 获取 AZ 和 LOS 二维位移量。接着, 分别对升/降轨对应的 LOS/AZ 二维位移量做小基线集 SBAS (small baseline subset) 处理, 通过将各个像对的时间跨度纳入计算过程, 将位移量换算为流速, 分别得到升/降轨对应的 LOS/AZ 冰面流速二维时间序列。最后, 根据星载 SAR 成像几何, 构建冰川三维流速解算模型, 联合升/降轨 LOS 和 AZ 流速时间序列解算出冰川在东西向、南北向和垂直向上的三维流速时间序列, 如式 (14) 所示。

点保持一致。保形三次样条插值方法是实现该目的最为常用的方法之一。

引入 RTOD 算法的 RTOD-3D-POSBAS 方法则在传统 3D PO-SBAS 方法经 SBAS 处理后, 对获取的升/降轨 LOS 与 AZ 冰面流速二维时间序列进行 RTOD 信号分解, 从而剔除其中的异常值分量, 得到 V_{i, LOS_clean}^A 、 V_{i, AZ_clean}^A 、 V_{i, LOS_clean}^D 、 V_{i, AZ_clean}^D , 技术流程如图 3 所示; 在此基础上构建三维流速解算模型 [式 (15)], 最终解出剔除异常流速值后的三维流速时间序列 $V_{U_clean}^i$ 、 $V_{E_clean}^i$ 、 $V_{N_clean}^i$ 。

$$\begin{bmatrix} V_{i, LOS_clean}^A \\ V_{i, AZ_clean}^A \\ V_{i, LOS_clean}^D \\ V_{i, AZ_clean}^D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \theta_A & \sin \theta_A \cos \alpha_A & -\sin \theta_A \sin \alpha_A \\ 0 & \sin \alpha_A & \cos \alpha_A \\ -\cos \theta_D & -\sin \theta_D \cos \alpha_D & -\sin \theta_D \sin \alpha_D \\ 0 & \sin \alpha_D & \cos \alpha_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{U_clean}^i \\ V_{E_clean}^i \\ V_{N_clean}^i \end{bmatrix} \quad (15)$$

3 数据结果处理与分析

3.1 实验区与数据

奥斯本冰川是一条入海型冰川, 分东、西两支。该冰川曾于 1986 年—1987 年发生过跃动, 最近一次跃动发生在 2019 年, 并于 2021 年结束。本文所用数据为 2018 年—2024 年获取的时间分辨率为 6—18 d 的 Sentinel-1A/B Level-1 单视复数升降轨 SAR 影像。其中, 降轨影像 286 景 (轨道号 154, 图幅号 327), 时间跨度范围为 2018-03-23—2024-05-20, 升轨影像 176 景 (轨道号 14, 图幅号 259), 时间跨度范围为 2018-03-31—2024-05-10。此外, 还选用了 8 景云覆盖率较低, 成像质量较高的 Sentinel-

2A/B 光学卫星影像 (成像日期分别为 2018-08-20、2018-09-10、2019-08-10、2019-08-21、2021-07-06、2021-08-01、2022-07-14、2022-08-28), 以及 2018 年—2024 年覆盖奥斯本冰川的 ITS_LIVE 数据集, 用于验证 Sentinel-1A/B SAR 影像解算的奥斯本冰川流速的准确性。奥斯本冰川的地理位置与形态如图 4 所示 (底图为 2019-08-21 成像的 Sentinel-2B 真彩色合成光学影像)。

3.2 奥斯本冰川西支中流线上不同方法流速监测结果对比

鉴于奥斯本冰川跃动期间流速极快, 为避免长时间间隔影像间同名点匹配的不准确性, 提升 POT 技术提取的冰面流速场的可靠性和完整性,

本文在进行 PO-MSBAS、RTOD-PO-MSBAS、3D PO-SBAS 以及 RTOD-3D-POSBAS 处理时, 将时间基线阈值设置为较小的 12 d。需要说明的是, 降轨部分时段 Sentinel-1A/B SAR 影像间时间间隔为 6 d, 个别时段为 18 d, 对应时间段的时间基线阈值相应设置为 6 d 或者 18 d。基于上述参数设置, 升轨

共构建 175 个像对, 降轨共构建 285 个像对。升轨 Sentinel-1 影像入射角为 33.76° , 方位角为 346.83° ; 降轨 Sentinel-1 影像入射角为 33.76° , 方位角为 193.19° 。在 POT 处理中, 经过测试, 本文设置匹配窗口大小为 256 (距离向) $\times 128$ (方位向), 信噪比阈值为 4.0。本文采用 GAMMA 软件进行上述 POT 处理。

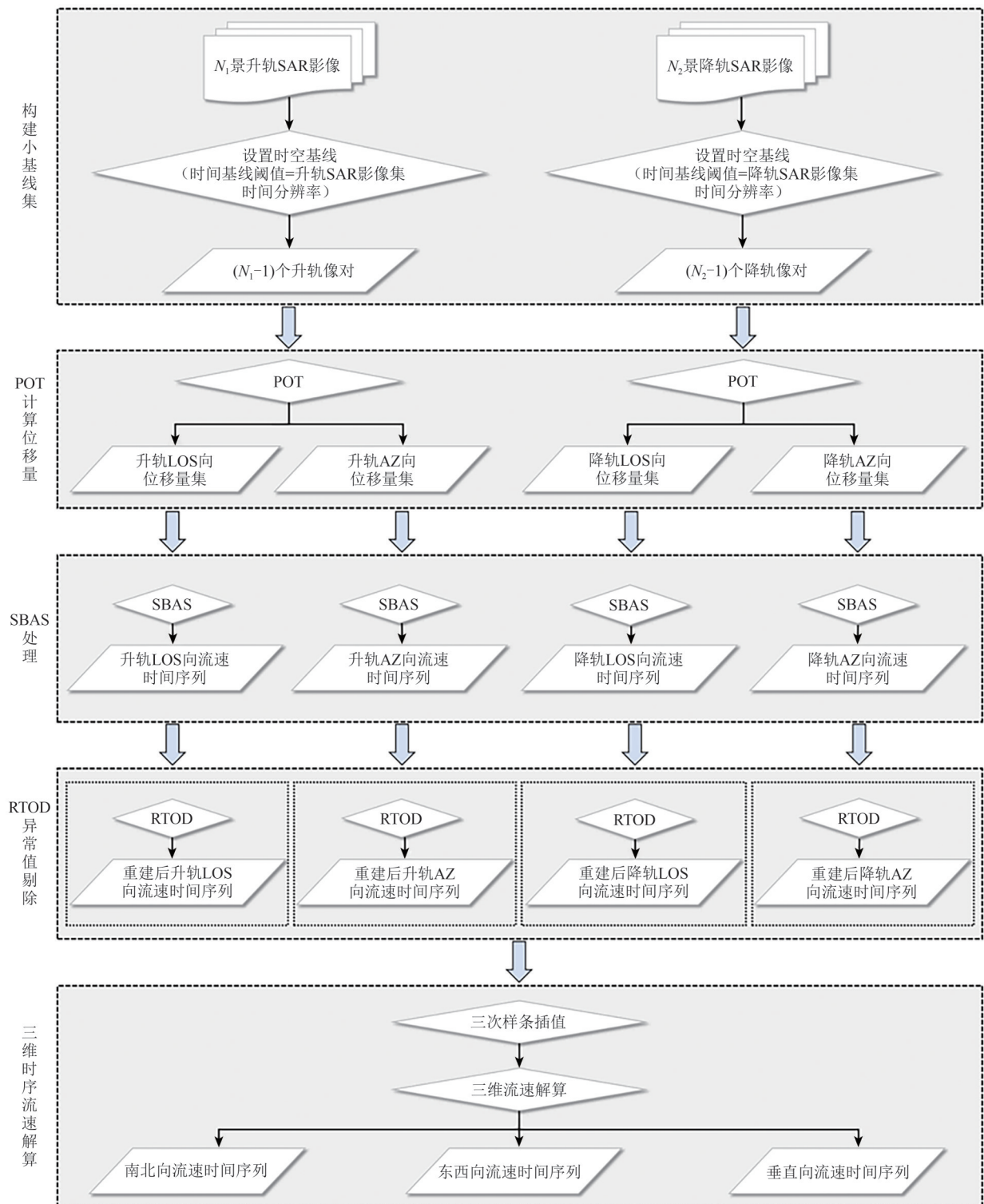


图3 RTOD-3D-POSBAS算法技术流程

Fig. 3 Flowchart of the RTOD-3D-POSBAS algorithm

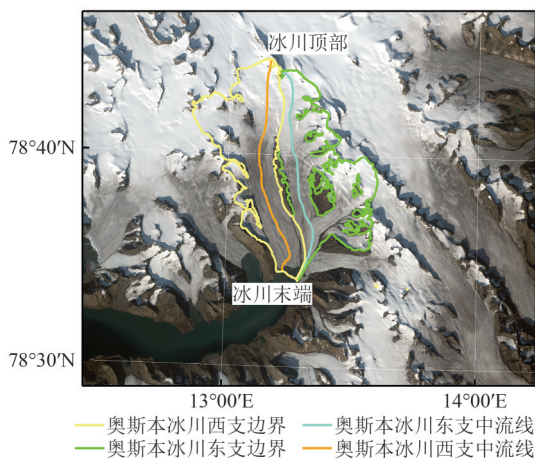


图4 研究区概况

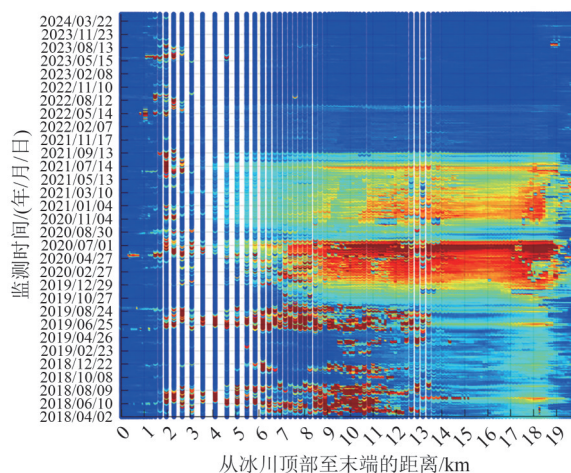
Fig. 4 The study area

在PO-MSBAS和RTOD-PO-MSBAS处理中，经Tikhonov正则化约束，稀疏矩阵的条件数大幅减小，本文中由 1.12×10^{16} 降至7.20。在构建式(12)和式(13)时，要求升/降轨时间跨度保持一致。为此，本文通过线性插值将降轨首个像对的时间跨度从2018-03-23—4月4日调整为2018-03-31—4月4日，将末个像对的时间跨度从2024-05-08—20日调整为2024年5月8日—10日，从而确保了升/降轨数据的起始时间(2018-03-31)和终止时间(2024-05-10)一致。最终，解算得到2018-03-31—2024-05-10 459个时段的冰面三维时序流速结果，时间分辨率为2 d、4 d、6 d、10 d、12 d或14 d。

为确保3D PO-SBAS与RTOD-3D-POSBAS方法解算的冰面流速时间序列在时间点分布上与PO-MSBAS及RTOD-PO-MSBAS结果相匹配，本文将所有像对时间跨度的中间时间点作为代表时刻，分别提取升轨175个和降轨285个中间时间点，合

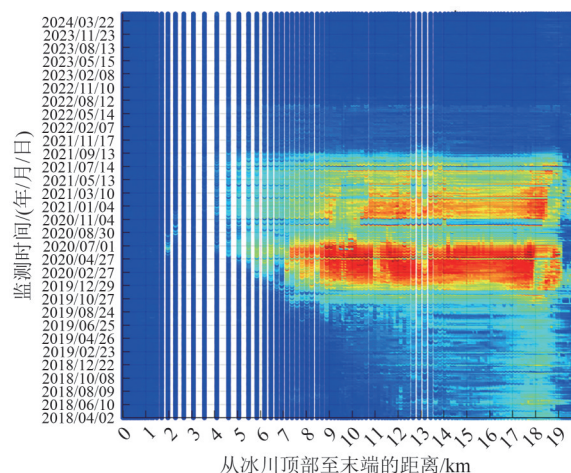
并为一个统一的升降轨时间序列。以此序列为基准，采用保形三次样条插值算法，分别对升轨与降轨的LOS及AZ二维流速时间序列进行插值处理。最终，解算得到2018-03-31—5月10日460个时段的冰面三维时序流速时间序列，时间分辨率为1 d、2 d、4—12 d或18 d。

图5和图6分别展示了采用PO-MSBAS、3D PO-SBAS、RTOD-PO-MSBAS和RTOD-3D-POSBAS方法解算得到的奥斯本冰川西支中流线水平向(即东西向与南北向流速的合成结果)和垂直向流速的时间序列变化。对比结果表明，本文提出的两种改进算法能有效抑制流速异常值，并更好地保留冰川真实的时序运动特征。由图5(a)、图5(c)可见，原始水平向流速解算结果中存在大量异常流速值，尤其在流速较低或变化平缓的区域(冰川顶部至冰川末端2—15 km)，致使真实的冰川流速时序变化趋势被干扰。相比之下，引入RTOD处理后的流速结果则显示出明显更干净、更连续的流速时间序列(图5(b)、(d))，高频波动的异常值得到有效压制，流速时序变化趋势更为清晰。如图6(a)、图6(c)所示，在沿冰川中流线2—15 km的范围内，垂直向流速时间序列中亦存在大量异常波动，尤以2018年4月—8月和2019年6月—8月时段最为显著。若未能有效探测并剔除这些异常流速值，极易将其误判为真实的冰川表面垂直向运动信号，从而错误解读流速的季节性变化规律、波动幅度及垂直向运动方向(表现为冰面抬升或下沉)。引入RTOD处理后，如图6(b)、图6(d)所示，垂直向流速异常值显著减少，流速时序连续性明显增强。



(a) PO-MSBAS解算的水平向流速时间序列

(a) Horizontal flow velocity time series derived from PO-MSBAS



(b) RTOD-PO-MSBAS解算的水平向流速时间序列

(b) Horizontal flow velocity time series derived from RTOD-PO-MSBAS

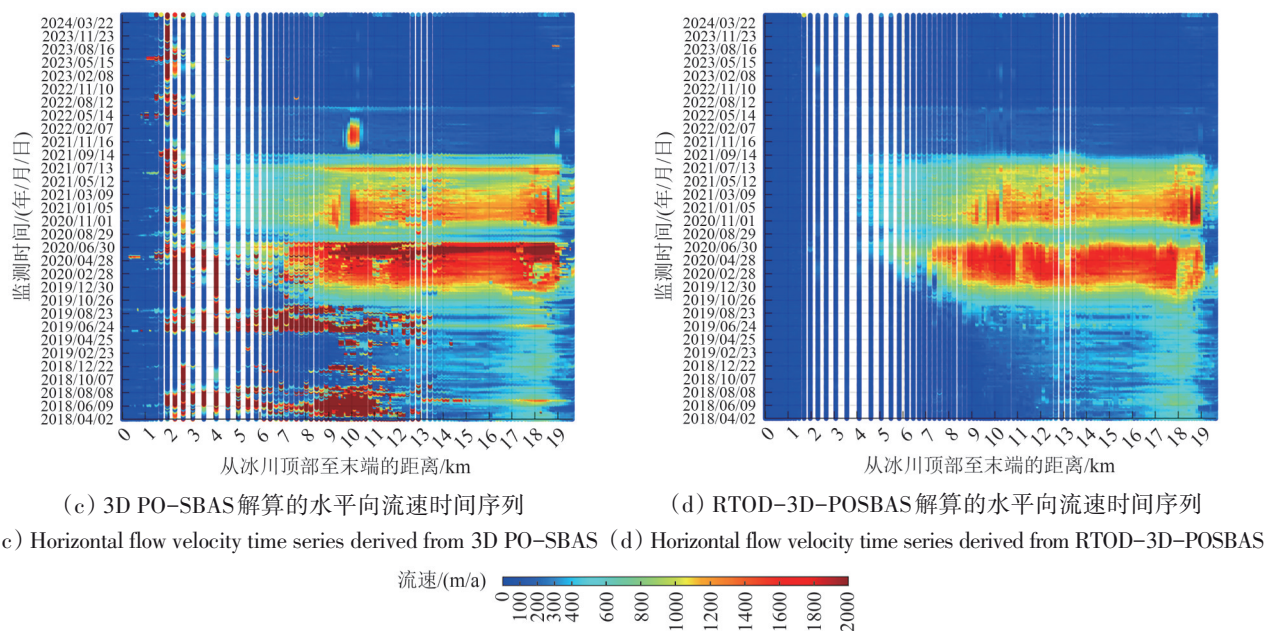
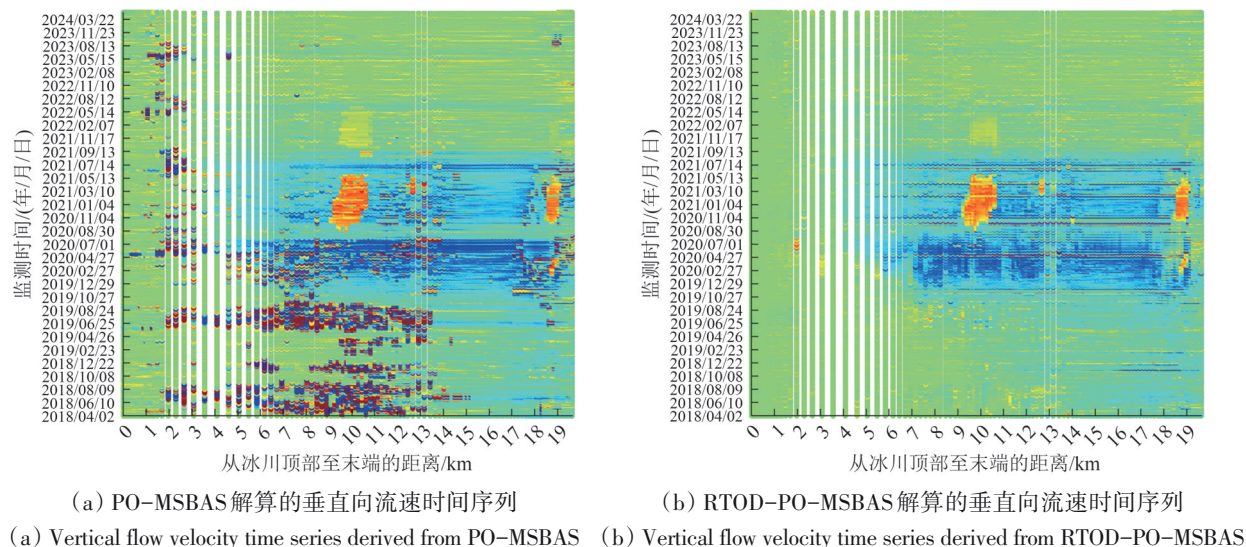


图5 不同方法解算的奥斯本冰川西支中流线上水平向流速时序结果对比

Fig. 5 Comparison of time-series horizontal flow velocity results on the central flow line of the western branch of Osbornbreen Glacier derived from different methods

值得注意的是, 部分区域经 RTOD 处理后流速信号出现减弱或增强的现象。以 2021 年 9 月—2022 年 2 月为例, 沿冰川中流线 9—10 km 处 (图 5 (c), (d)), 流速信号在经 RTOD 处理后有所减弱。分析认为, 这主要归因于 RTOD 算法将时序信号分解为趋势分量、异常值分量与残差分量, 部分高频或局部信号被视为异常值或残差滤除, 在提升整体信噪比的同时牺牲了一定程度的细节, 体现了噪声抑制与细节保留之间的权衡。局部区域则出现流速增强现象, 如同期冰川末端中流线 18—19 km 范围内 (图 6 (c), (d))。分析认为,

该区域的原始流速值虽然较小, 但邻域波动较大, 经自适应窗口移动平均处理后, 趋势分量略高于原始中心值; 且因趋势分量的方差贡献率占主导地位, 重建信号主要保留了该趋势值, 从而形成了局部流速信号增强的现象。从整体上看, 尽管 RTOD 算法在局部微小尺度上可能因平滑和拟合而产生细微的数值变化, 但这是其在平滑噪声、提取流速的主导性变化特征过程中产生的必然结果。相较于传统算法, 经 RTOD 处理后的流速场在宏观尺度上能够更清晰地反映冰川的整体运动特征。



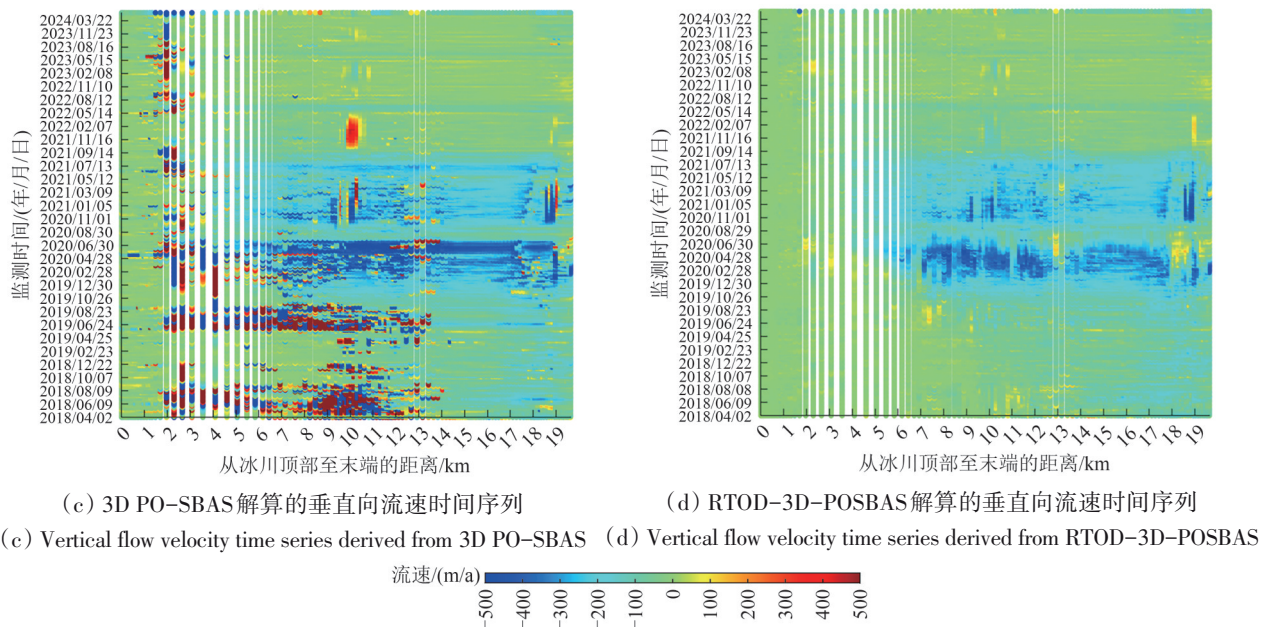


图6 不同方法解算的奥斯本冰川西支中流线上垂直向流速时序结果对比

Fig. 6 Comparison of time-series vertical flow velocity results on the central flow line of the western branch of Osbornbreen Glacier derived from different methods

由于在2018年—2024年监测时段内缺乏奥斯本冰川的实地流速观测数据, 本文将其与基于Sentinel-2A/B光学影像提取的中流线水平向流速结果进行对比, 以评估引入RTOD算法后偏移量追踪小基线集方法在冰川流速计算中的可靠性与准确性。由于研究区跃动冰川地形复杂, 地面观测难以开展, 实测数据获取受限。在此情况下, 采用不同传感器、不同成像机制但精度相当的遥感数据进行交叉验证, 是评估冰川流速结果可靠性的有效途径。Sentinel-1A/B SAR影像与Sentinel-2A/B光学影像提取流速的精度均受限于像素分辨率, 二者处于相近的精度水平。通过对比两种独立数据源提取的流速结果, 可以有效检验冰川流速的空间分布特征及变化趋势的一致性, 从而间接证明Sentinel-1A/B SAR影像流速解算结果的可靠性。具体而言, 利用3.1节所列的8景Sentinel-2A/B光学影像, 通过COSI-Corr软件计算了4个时段内的水平向流速, 分别为: 2018-08-20—9月10日、2019-08-10—21日、2021-07-06—8月1日, 以及2022-07-14—8月28日。在此基础上, 分别计算了PO-MSBAS、3D PO-SBAS、RTOD-PO-MSBAS和RTOD-3D-POSBAS 4种方法解算的水平向流速与Sentinel-2A/B光学影像提取结果之间的相关系数及四分位距IQR (interquartile range), 从而对SAR冰川流速解算结果进行定量评价。

从图7可以看出, 在西支冰川上, 传统PO-MSBAS与3D PO-SBAS方法因未剔除异常值, 其解算的水平向流速与Sentinel-2A/B光学影像提取结果之间存在明显偏差。尤其在2018-08-20—9月10日, PO-MSBAS解算流速与Sentinel-2A/B光学影像提取流速的相关系数仅为-0.33 (图7 (a) I), 3D PO-SBAS解算流速与Sentinel-2A/B光学影像提取流速的相关系数也仅为-0.26 (图7 (a) II), 两者均呈现错误的负相关, 表明异常值严重影响了SAR影像提取流速与光学影像流速结果的一致性。经RTOD算法处理后, RTOD-PO-MSBAS和RTOD-3D-POSBAS解算流速与Sentinel-2A/B光学影像提取流速的一致性显著改善。在2018年同期, 相关系数分别提高至0.78 (图7 (a) III) 和0.79 (图7 (a) IV), Sentinel-1A/B SAR影像与Sentinel-2A/B光学影像提取流速差值的IQR值也从PO-MSBAS的465.20降至142.42, 3D PO-SBAS的324.41降至106.86。在2019-08-10—2019-08-21, PO-MSBAS与3D PO-SBAS解算流速与Sentinel-2A/B光学影像提取流速原本为负相关 (图7 (b) I, (b) II), 经RTOD校正后均转为正相关, 相关系数分别达到0.51 (图7 (b) III) 和0.64 (图7 (b) IV)。在2021-07-06—8月1日, 改进后算法的相关性进一步提高, RTOD-PO-MSBAS和RTOD-3D-POSBAS解算流速与Sentinel-2A/B光学影像提取流速的

相关系数分别达到 0.97 (图 7 (c) III) 和 0.98 (图 7 (c) IV)。在 2022-07-14—8 月 28 日, 经 RTOD

处理后, 约 700 m/a 的流速异常值 (图 7 (d) II) 亦能被有效识别并剔除 (图 7 (d) IV)。

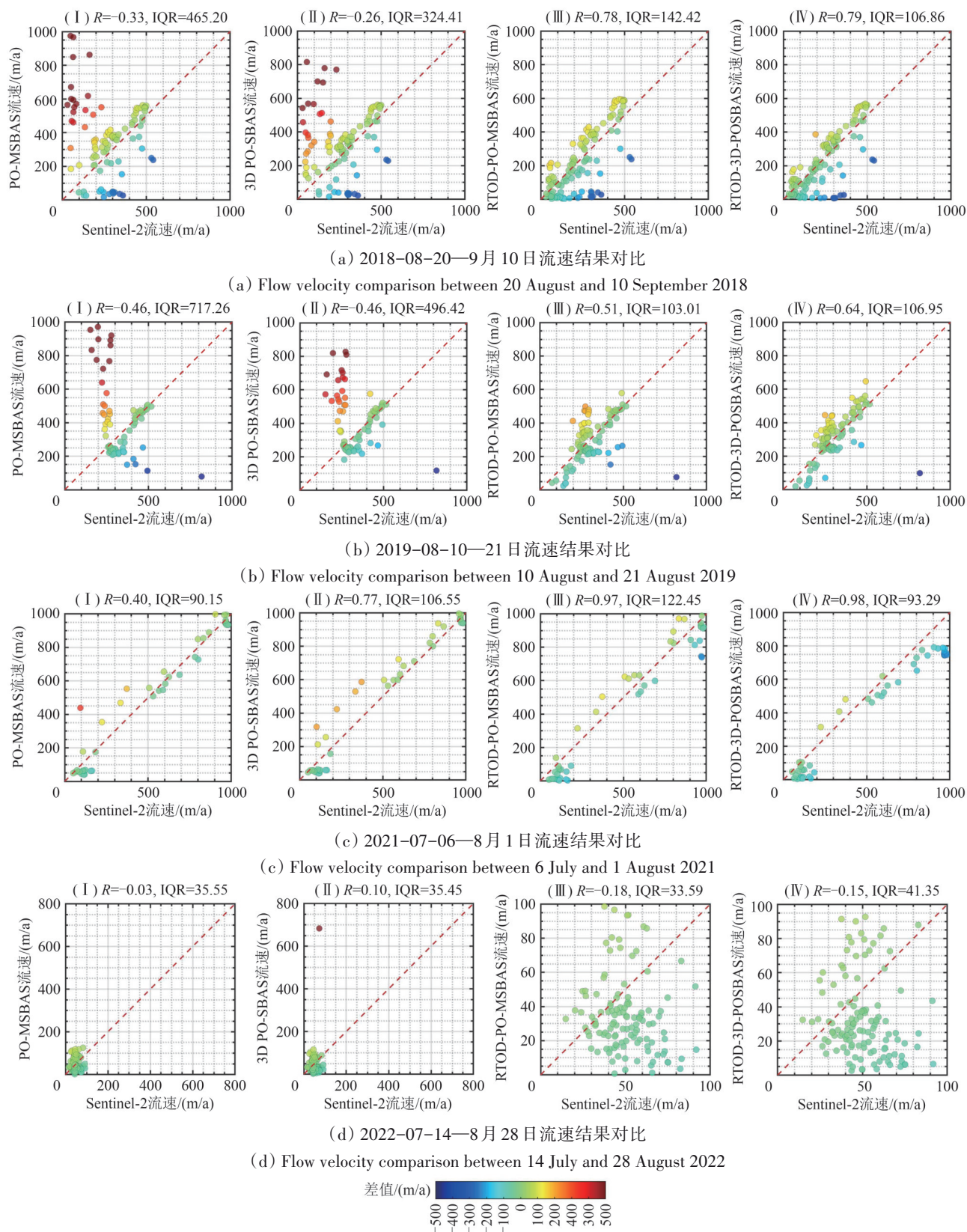


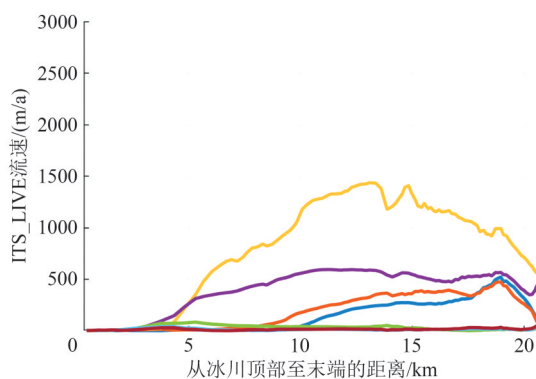
图 7 不同时间段西支冰川上 4 种算法与 Sentinel-2A/B 光学影像提取的水平向流速对比
Fig. 7 Comparison of horizontal flow velocities derived from four methods and Sentinel-2A/B data on the western branch of Osbornreen Glacier

图8展示了采用两种传统算法及RTOD-PO-MSBAS、RTOD-3D-POSBAS算法解算的西支冰川水平向流速, 与ITS_LIVE流速产品的对比结果。其中, ITS_LIVE流速产品提供了奥斯本冰川2018年—2024年空间分辨率为120 m、时间分辨率为1 a的年平均水平向流速; 而基于Sentinel-1A/B SAR影像提取的冰川流速场, 其空间分辨率可达30 m, 时间分辨率提升至1—18 d或2—14 d (详见3.2节)。为保证数据的可比性, 在进行对比前, 将Sentinel-1A/B SAR影像提取的流速场空间分辨率降采样至120 m, 并采用加权时间平均将时间分辨率降采样至1年。从图8 (a) 可以看出, 2018年—2024年, 奥斯本冰川西支的水平向流速呈现出先升后降的变化趋势。具体而言, 2018年—2020年流速持续上升, 于2020年达到峰值, 最快约1450 m/a; 此后流速逐年下降, 至2023年和2024年已降至0—50 m/a的低速波动区间。从算法表现来看, RTOD-PO-MSBAS和RTOD-3D-POSBAS解算的各年份流速曲

线, 与ITS_LIVE流速产品具有较好的一致性, 能够较为准确地刻画上述年际变化特征 (图8 (d), (e))。与ITS_LIVE流速产品相比, RTOD-PO-MSBAS和RTOD-3D-POSBAS方法解算的流速差值在2018年—2021年多数控制在150 m/a以内, 而在2022年—2024年进一步缩小至50 m/a范围内 (图8 (f))。相比之下, 传统算法由于受异常值影响, 解算结果波动较大, 难以准确刻画西支冰川中流线上的流速年际演变规律 (图8 (b), (c))。

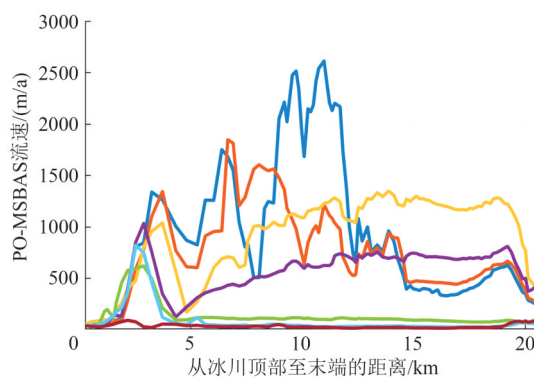
3.3 奥斯本冰川东支中流线上不同方法流速监测结果对比

图9与图10分别展示了在奥斯本冰川东支中流线上, 采用PO-MSBAS、3D PO-SBAS、RTOD-PO-MSBAS及RTOD-3D-POSBAS方法获得的水平和垂直向流速时间序列结果。通过与未引入RTOD的传统方法结果对比可明显看出, RTOD处理能够有效抑制异常值对流速序列的影响, 显著提升结果的可靠性。



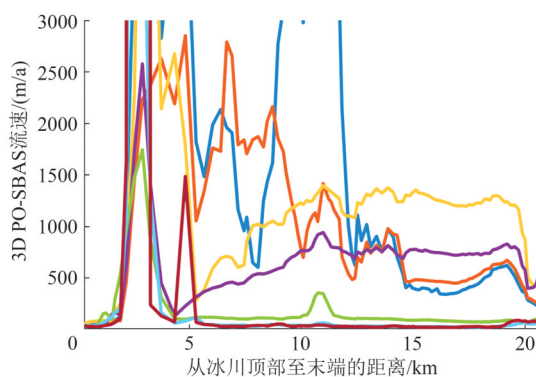
(a) ITS_LIVE 流速

(a) ITS_LIVE velocity



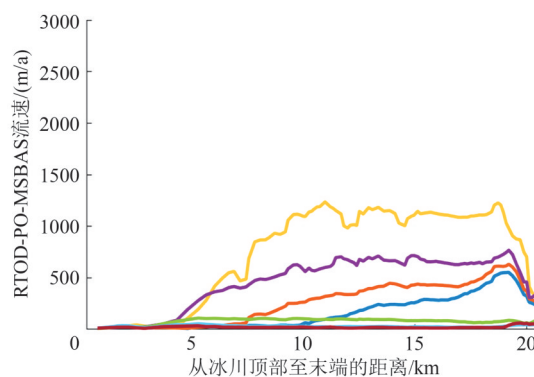
(b) PO-MSBAS解算的流速

(b) Velocity derived from PO-MSBAS



(c) 3D PO-SBAS解算的流速

(c) Velocity derived from 3D PO-SBAS



(d) RTOD-PO-MSBAS解算的流速

(d) Velocity derived from RTOD-PO-MSBAS

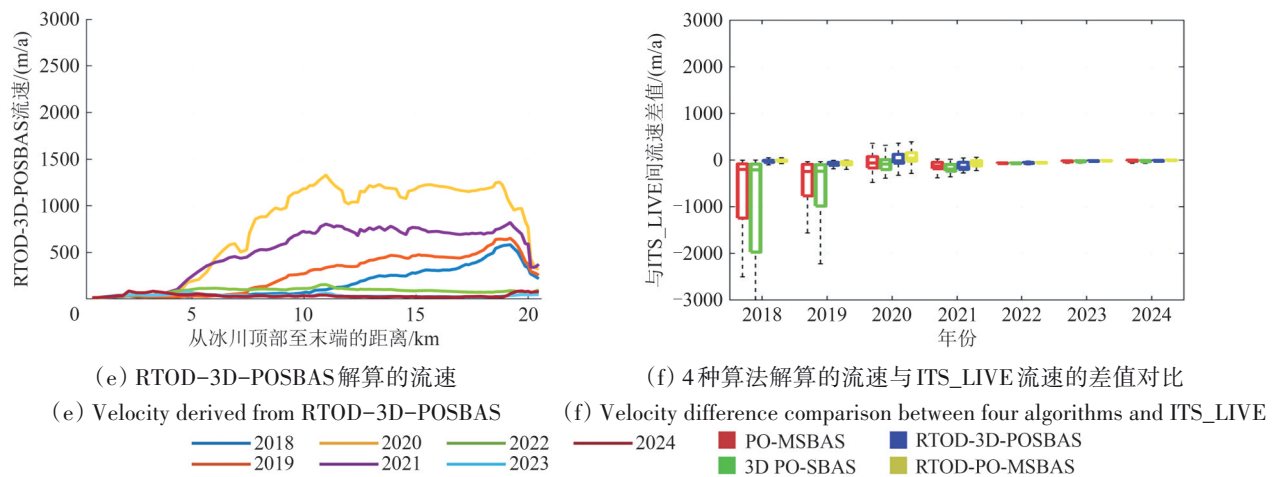


图8 2018年—2024年4种算法解算的西支冰川流速与ITS_LIVE流速产品对比

Fig. 8 Comparison of four methods with ITS_LIVE glacier flow velocity products on the western branch of Oslobreen Glacier from 2018 to 2024

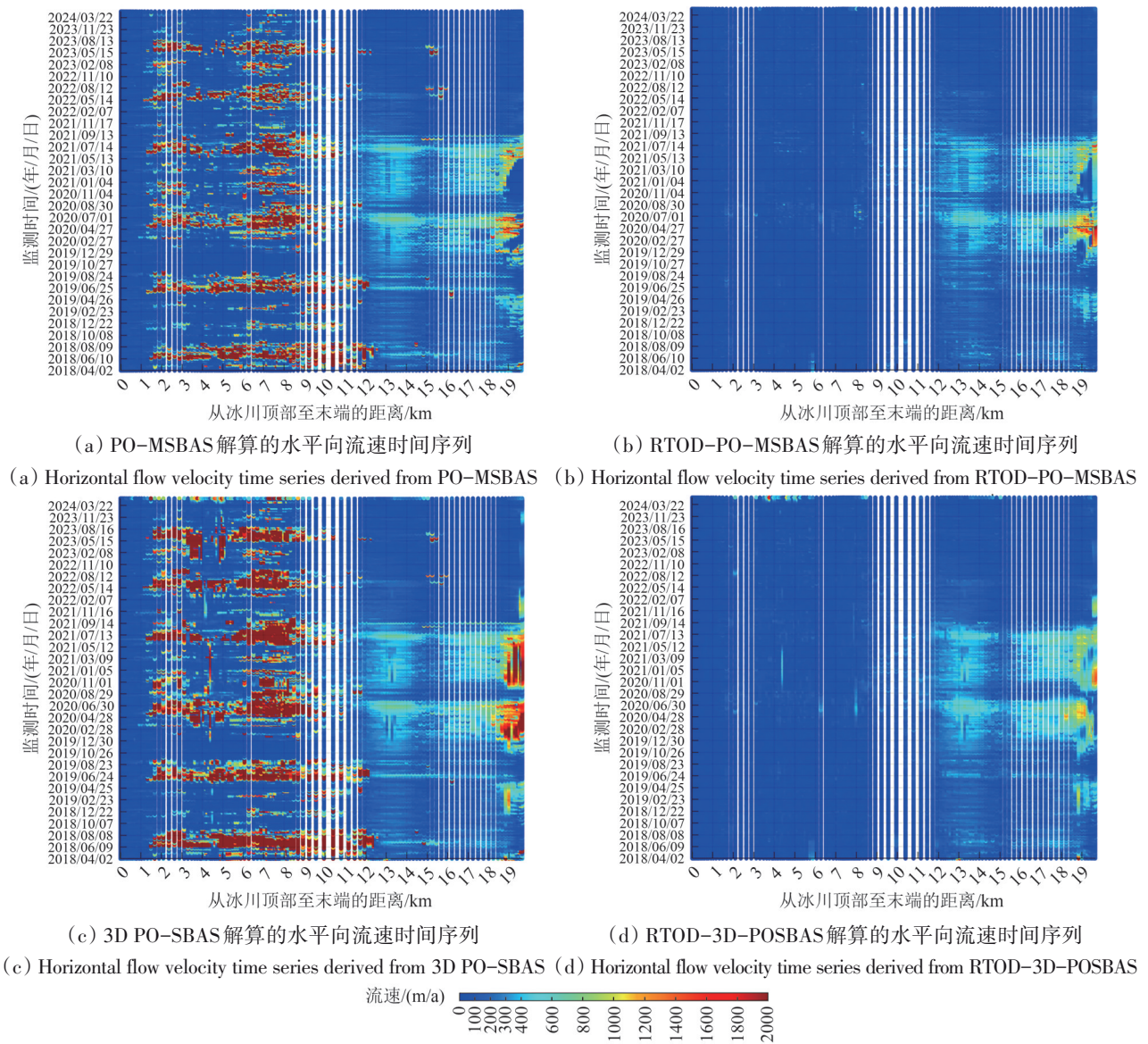


图9 不同方法解算的奥斯本冰川东支中流线上水平向流速时序结果对比

Fig. 9 Comparison of time-series horizontal flow velocity results on the central flow line of the eastern branch of Oslobreen Glacier derived from different methods

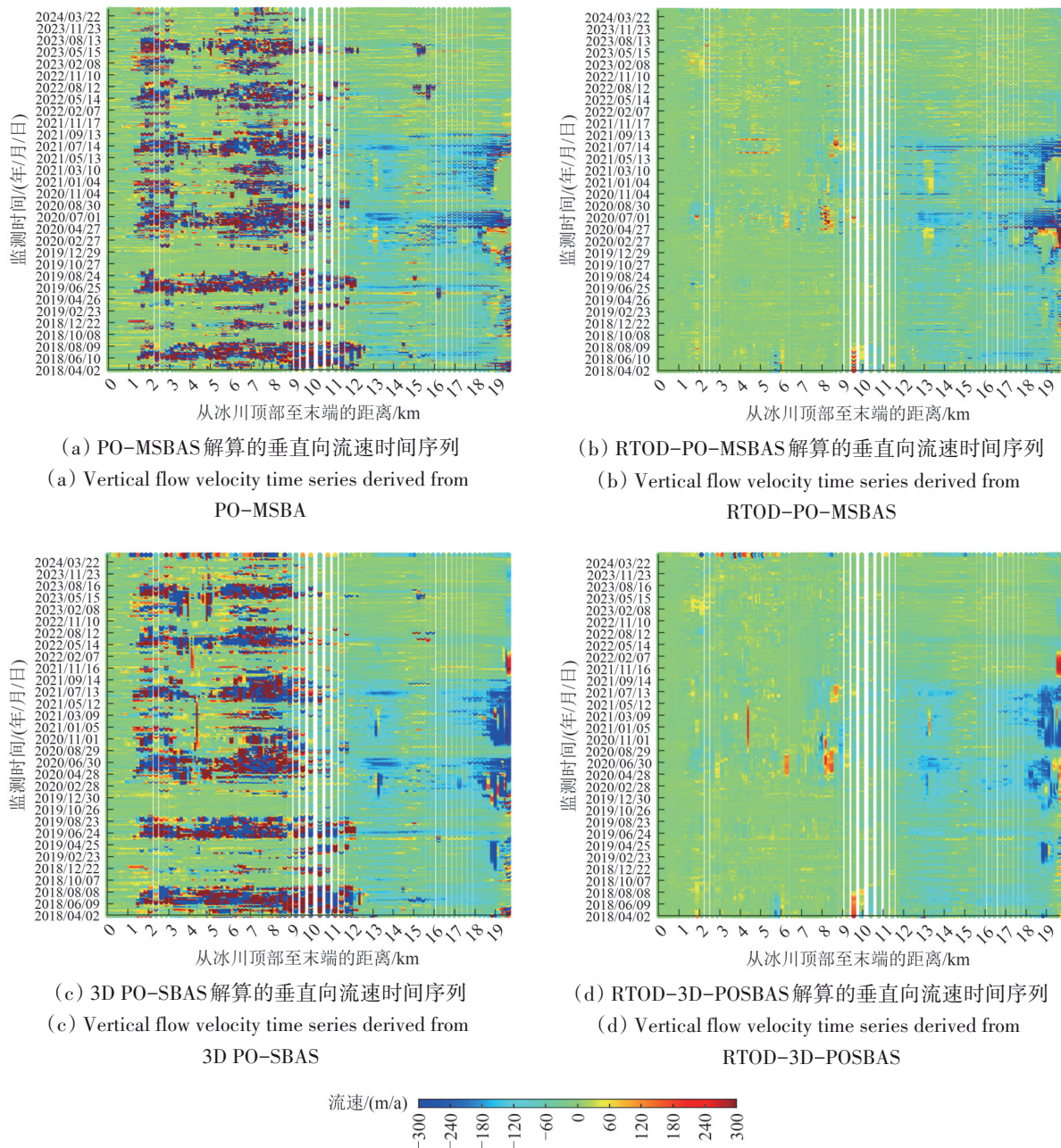


图10 不同方法解算的奥斯本冰川东支中流线上垂直向流速时序结果对比

Fig. 10 Comparison of time-series vertical flow velocity results on the central flow line of the eastern branch of Osbornbreen Glacier derived from different methods

在奥斯本冰川东支中流线1.5—12.5 km范围内(图9 (a)、(c), 图10 (a)、(c)), 传统PO-MSBAS与3D PO-SBAS方法解算的流速时间序列中存在显著的高频噪声, 且这些异常值表现出明显的季节性聚集特征。具体而言, 在2018年—2024年, 异常值多集中出现于夏季时段, 包括2018年6月—8月、2019年6月—8月、2020年4月—8月、2021年5月—9月、2022年5月—8月以及2023年5月—8月。此

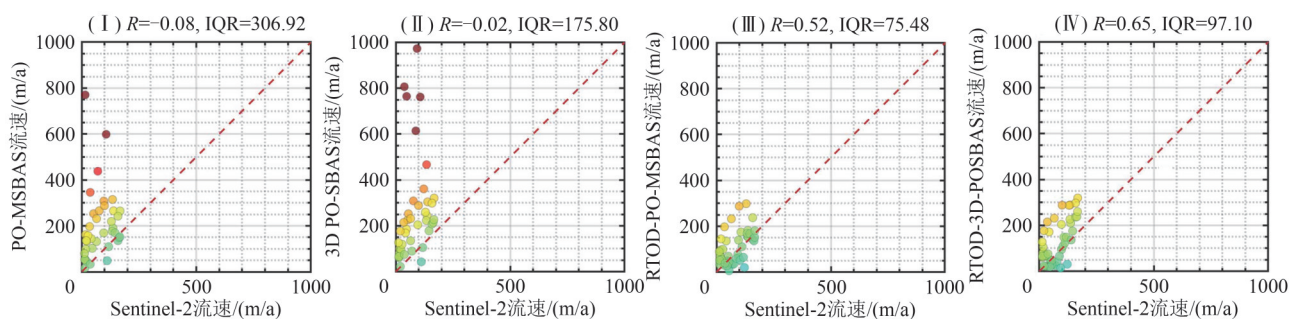
类噪声严重干扰了对冰川真实运动趋势的识别, 若不予剔除, 极易导致误判东支冰川存在显著的季节性变化。相比之下, 经RTOD算法处理后的结果(图9 (b)、(d), 图10 (b)、(d))表现出显著优势。RTOD-PO-MSBAS与RTOD-3D-POSBAS方法获得的时序曲线更为平滑连续, 有效抑制了中流线1.5—12.5 km范围内夏季频繁出现的异常值, 表明RTOD处理能够可靠地识别并移除流速时序中

的异常分量,提升解算结果的可靠性。

图 11 展示了分别采用传统算法与本文提出的 RTOD-PO-MSBAS 和 RTOD-3D-POSBAS 算法解算的东支冰川水平向流速,与基于 Sentinel-2A/B 光学影像提取的 4 个时段光学流速结果的对比。图 12 展示了上述 4 种算法解算的东支冰川流速与 ITS_LIVE 流速产品的对比结果。从图 11 和图 12 可以看出,经 RTOD 处理后,基于偏移量追踪小基线集方法获得的流速与 Sentinel-2A/B 光学影像提取的流速和 ITS_LIVE 流速产品的一致性显著提高。传统 MSBAS-3D 方法解算的流速与 Sentinel-2A/B 光学影像提取的流速相关性较差,相关系数介于 -0.01 — -0.26 之间, IQR 则处于 179.17 — 1897.71 (图 11 (a) I—(d) I)。类似地,3D PO-SBAS 方法解算的流速也与光学影像提取的流速结果呈现明显偏差,相关系数最高仅为 -0.27 , IQR 范围达 140.07 — 3056.97 (图 11 (a) II—(d) II)。引入 RTOD 算法后,偏移量追踪小基线集方法与 Sentinel-2A/B 光学影像提取的流速在一致性方面表现出明显的提升。RTOD-PO-MSBAS 方法解算的流速与 Sentinel-2A/

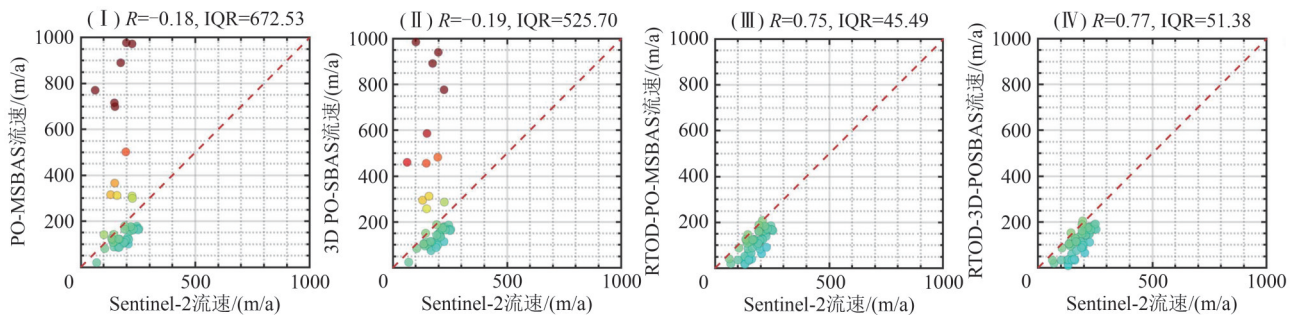
B 光学影像提取的流速相关系数提高至 0.47 — 0.80 , IQR 大幅降低至 40.70 — 101.37 (图 11 (a) III—(d) III); RTOD-3D-POSBAS 也表现出较好的改进效果,相关系数达 0.53 — 0.78 , IQR 最低为 44.08 (图 11 (a) IV—(d) IV)。

由图 12 可知,2018 年—2024 年,奥斯本冰川东支与西支的流速变化趋势较为一致:对东支冰川而言,2018 年—2020 年流速持续上升,于 2020 年达到峰值,此后逐年回落。在空间分布上,沿冰川中流线 10 — 15 km 处出现一个明显的流速峰值,最快可达约 300 m/a;自 15 km 处向冰川末端,流速再次呈现显著上升趋势。从算法表现来看,RTOD-PO-MSBAS 和 RTOD-3D-POSBAS 解算的各年份流速曲线与 ITS_LIVE 流速产品吻合较好,两者之间的流速差值多数控制在 100 m/a 以内 (图 12 (f)),能够较为准确地刻画上述时空年际变化特征 (图 12 (d), (e))。相比之下,传统算法因受异常值影响,解算结果波动较大,难以有效反映东支冰川中流线上的流速年际演变规律 (图 12 (b), (c))。



(a) 2018-08-20—9月10日流速结果对比

(a) Flow velocity comparison between 20 August and 10 September 2018



(b) 2019-08-10—21日流速结果对比

(b) Flow velocity comparison between 10 August and 21 August 2019

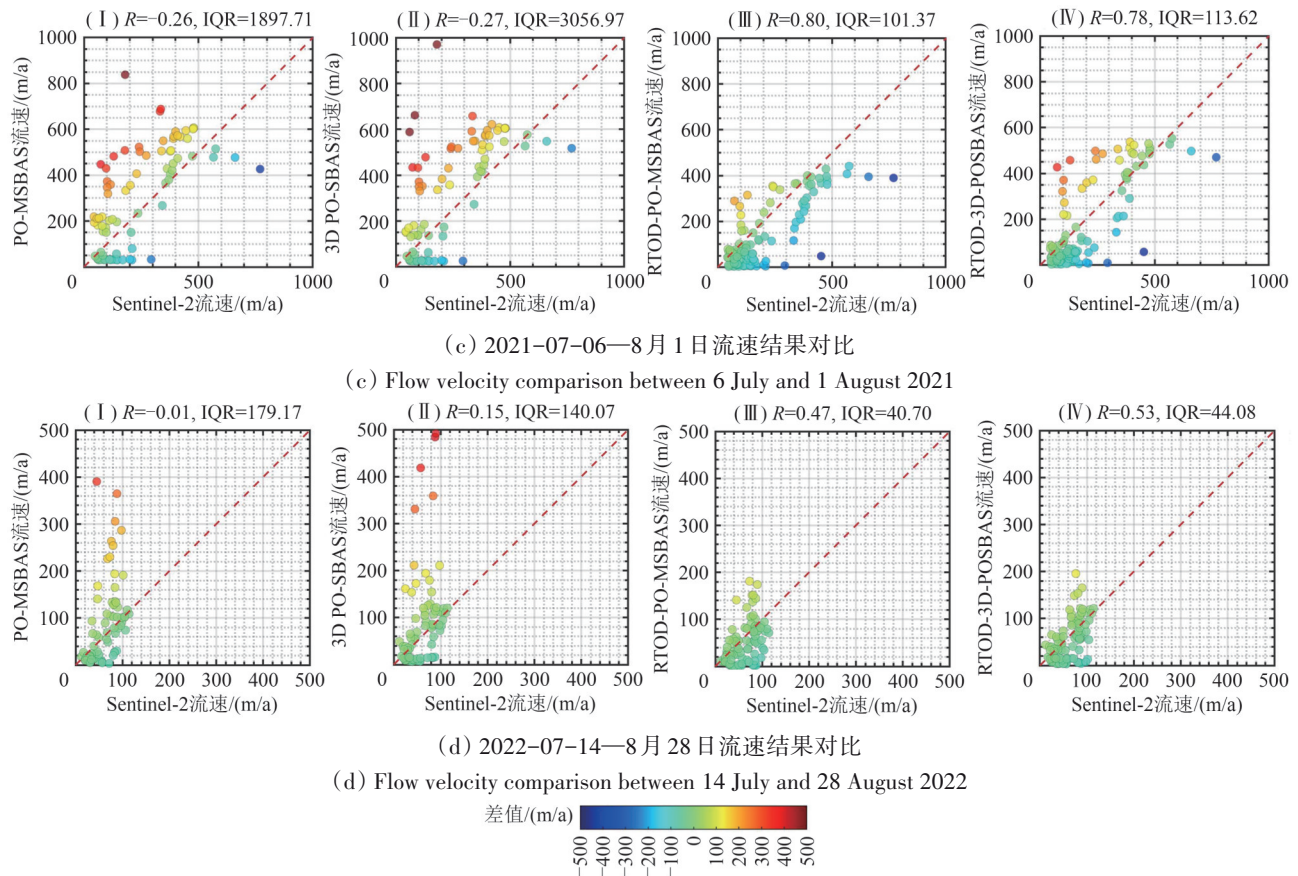
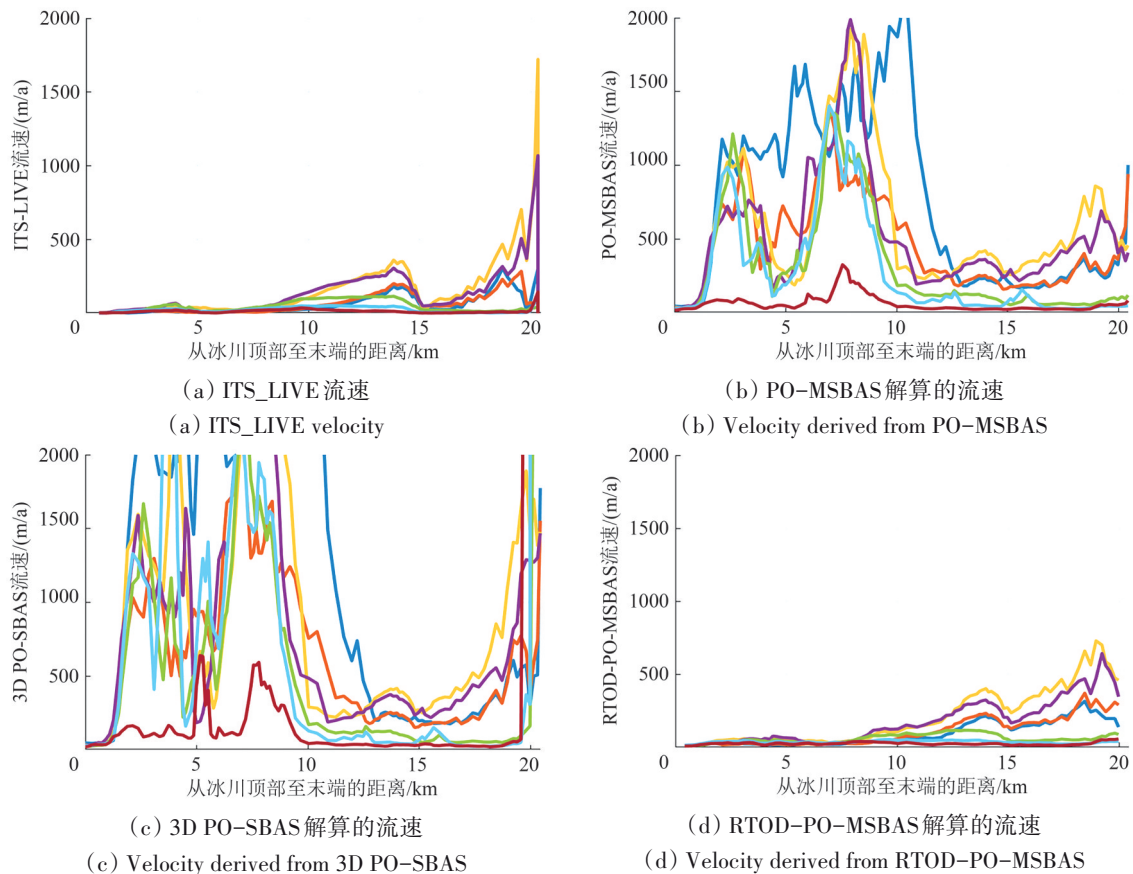


图 11 不同监测时间段内东支冰川上 4 种算法与 Sentinel-2A/B 光学影像提取的水平向流速对比

Fig. 11 Comparison of horizontal flow velocities derived from four methods and Sentinel-2A/B data on the eastern branch of Osonebreen Glacier



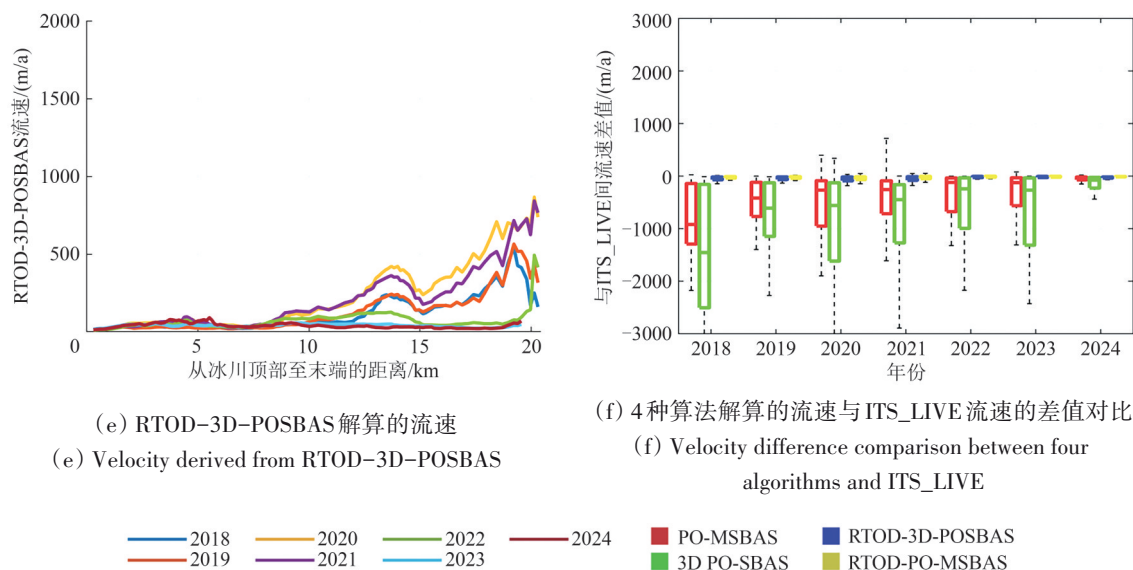


图12 2018年—2024年东支冰川上4种方法解算的西支冰川流速与ITS_LIVE流速产品对比
Fig. 12 Comparison of four methods with ITS_LIVE glacier flow velocity products on the eastern branch of Oslobreen Glacier from 2018 to 2024

总体而言,经RTOD方法处理后,基于Sentinel-1A/B SAR影像提取的水平向流速与Sentinel-2A/B光学影像提取结果及ITS_LIVE流速产品之间的一致性显著提升。在西支冰川上, Sentinel-1A/B SAR影像与Sentinel-2A/B光学影像流速提取结果相关系数的绝对值从处理前的0.03—0.77(图7(a) I—(d) I、(a) II—(d) II)提升至0.15—0.98(图7(a) III—(d) III、(a) IV—(d) IV);同时, IQR值由原先的35.45—717.26下降至33.59—142.42,表明RTOD方法有效抑制了异常值对解算结果的干扰,显著提升了流速场的稳定性和可靠性。在东支冰川上, RTOD方法同样表现出显著的改善效果。Sentinel-1A/B SAR影像与Sentinel-2A/B光学影像流速提取结果相关系数绝对值从处理前的0.01—0.27(图11(a) I—(d) I、(a) II—(d) II)提高至0.47—0.80(图11(a) III—(d) III、(a) IV—(d) IV); IQR值亦从140.07—3056.97大幅下降至40.70—113.62。与ITS_LIVE流速产品相比, RTOD-PO-MSBAS和RTOD-3D-POSBAS方法所解算的流速场能够更准确地刻画奥斯本冰川流速的时空变化特征,进一步验证了引入RTOD处理后的偏移量追踪

小基线集算法在跃动冰川流速监测中的有效性和鲁棒性。

3.4 整条冰川上不同方法三维流速监测结果对比

图13—图15展示了采用传统算法(PO-MSBAS、3D PO-SBAS)和本文改进算法(RTOD-PO-MSBAS、RTOD-3D-POSBAS),在2018年、2019年、2021年、2022年4个年份的部分时段内,对奥斯本整条冰川上东西向、南北向、垂直向流速的解算结果。对比发现,在4个监测年份对应的8个监测时段内,改进后算法的三维流速解算结果均显著优于传统算法。传统算法解算的冰川流速场表现出破碎、不连续的斑块,空间一致性较差(图13(a)和(c),图14(a)和(c),图15(a)和(c)),这些异常值干扰了对真实三维流速信息的识别;而改进后的RTOD系列算法结果中(图13(b)和(d),图14(b)和(d),图15(b)和(d)),上述异常值被有效剔除,冰川流速场展现出较好的空间连续性。在冰川中上游至末端,形成了平滑的、物理意义更合理的流速分布场,为后续冰川动力学特征分析解译提供了更高质量的冰川流速数据支撑。

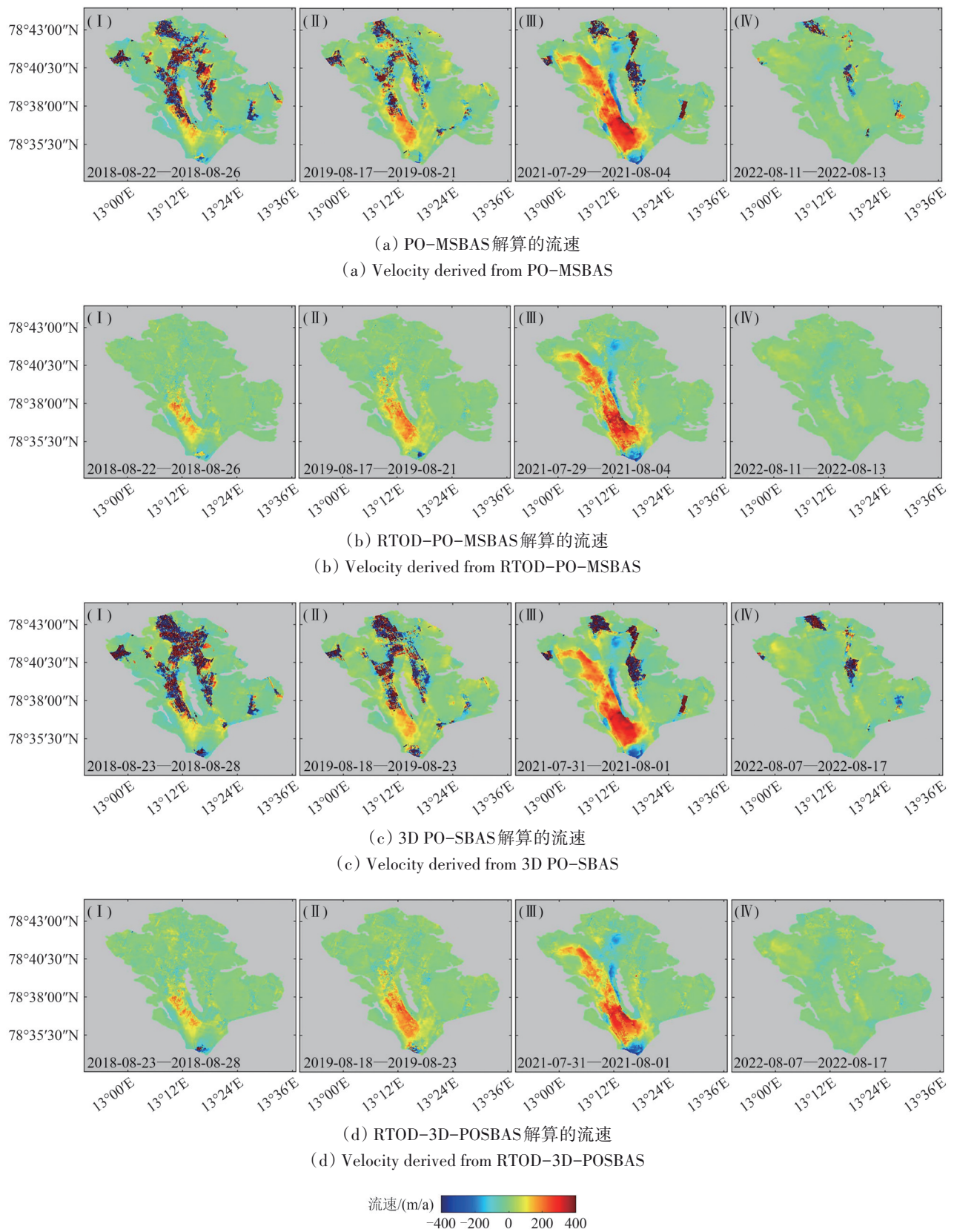


图 13 不同监测时间段内 4 种算法解算的奥斯本冰川东西向流速对比

Fig. 13 Comparison of east-west velocities of the Osbornbreen Glacier from four methods over different monitoring periods

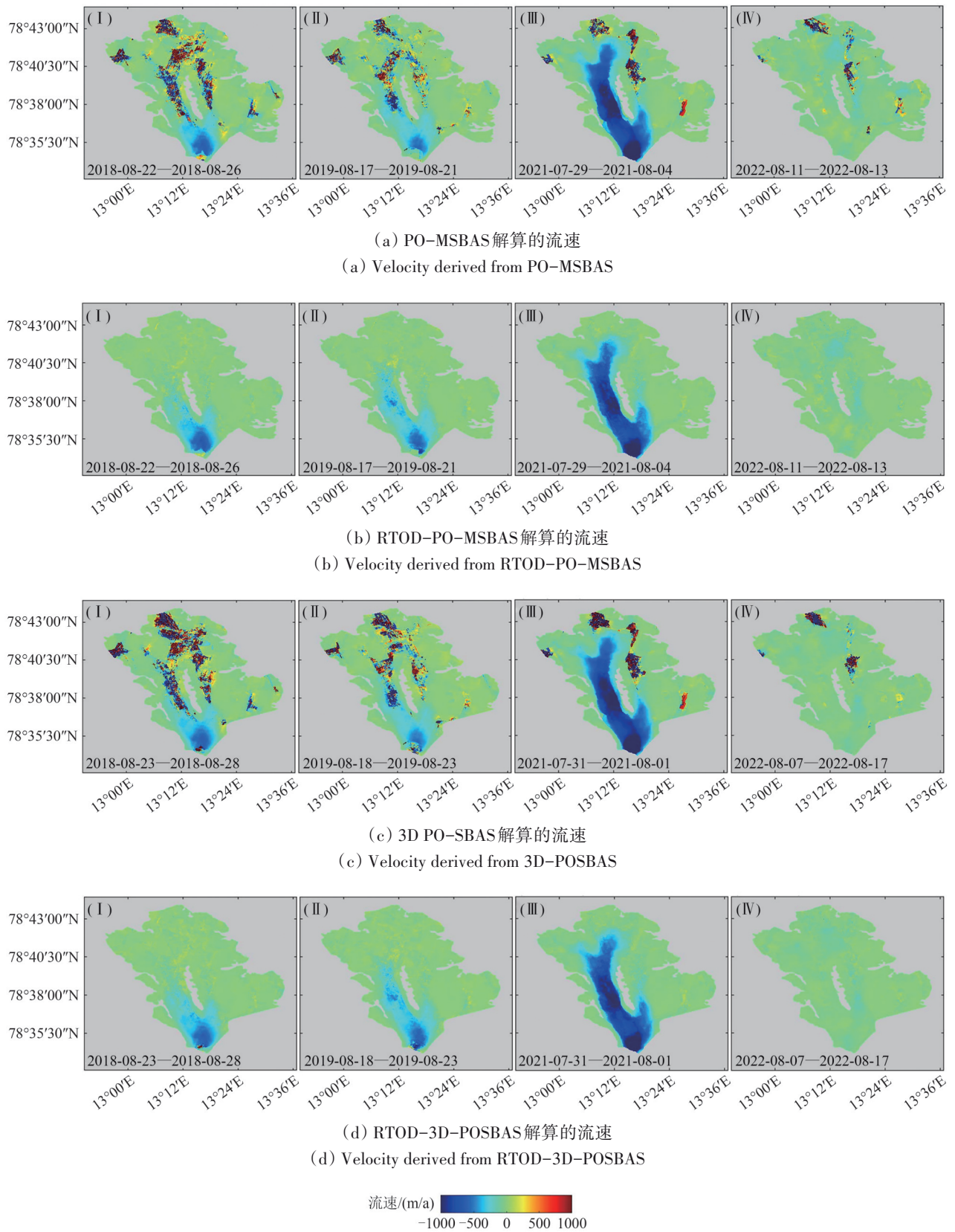


图 14 不同监测时间段内 4 种算法解算的奥斯本冰川南北向流速对比

Fig. 14 Comparison of north-south velocities of the Osbornbreen Glacier from four methods over different monitoring periods

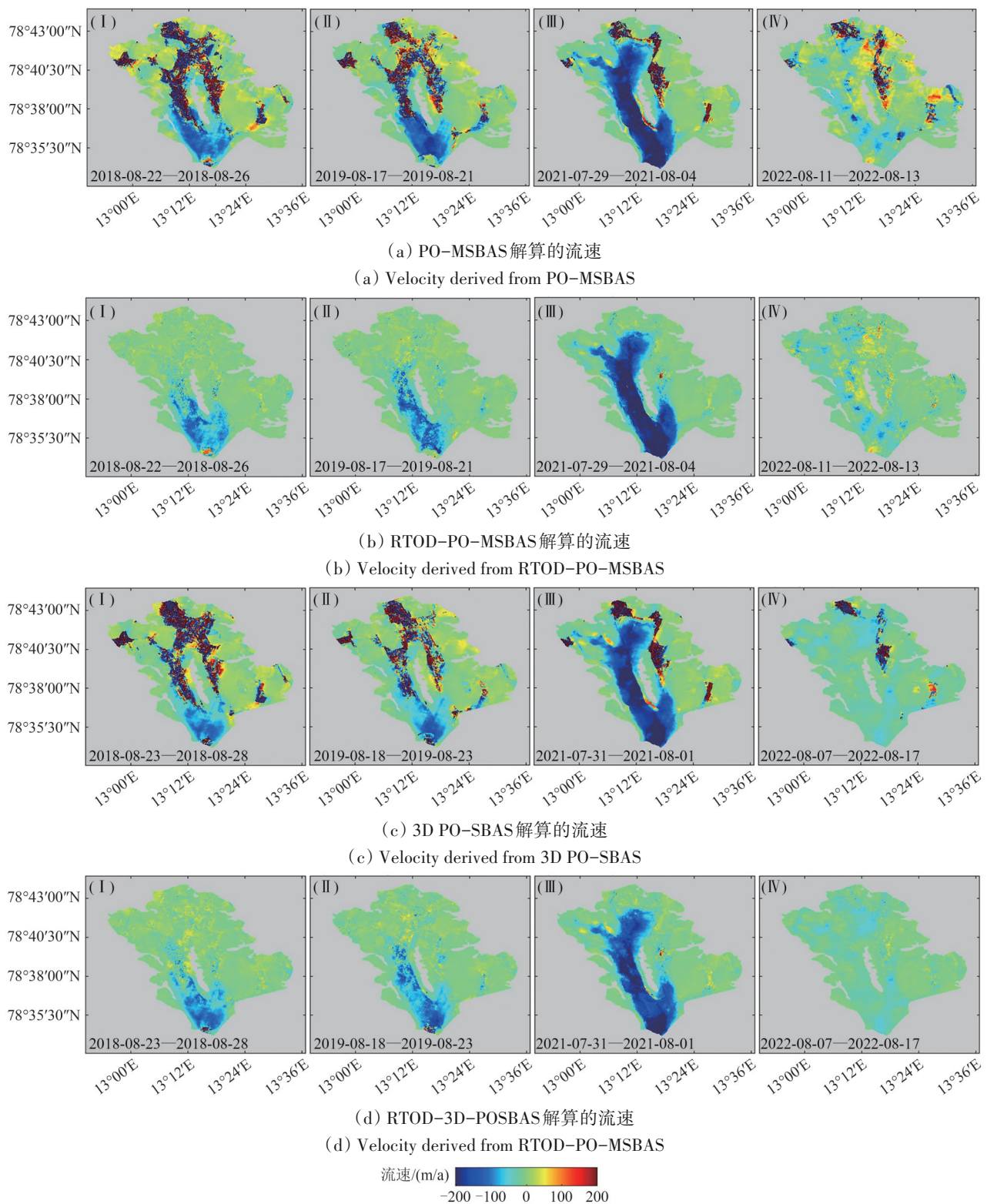


图 15 不同监测时间段内 4 种算法解算的奥斯本冰川垂直向流速对比

Fig. 15 Comparison of vertical velocities of the Osbornreen Glacier from four methods over different monitoring periods

4 结 论

本文针对传统偏移量追踪小基线集方法在跃动冰川流速监测中存在的异常值干扰问题，提出

了 RTOD 的处理策略，并将其集成至传统的 PO-MSBAS 和 3D PO-SBAS 方法中，形成 RTOD-PO-MSBAS 和 RTOD-3D-POSBAS 两种改进算法。在斯瓦尔巴群岛的奥斯本冰川东、西支的实验中，RTOD

方法显著抑制了流速时间序列中的异常波动,提升了流速信号的时序连续性,流速解算结果与利用 Sentinel-2A/B 光学遥感影像提取的流速结果和 ITS_LIVE 流速产品一致性均较强。该方法不仅有效剔除了冰川流速监测异常值,还保留了冰川真实的运动趋势,为跃动冰川的动态监测和运动机制分析提供了可靠的技术手段和数据基础。

志 谢 本次实验使用的 Sentinel-1A/B 升降轨 SAR 数据和 Sentinel-2A/B 光学影像数据由欧洲航天局提供, COSI-Corr 软件由加州理工学院提供, ITS_LIVE 流速产品由美国国家冰雪数据中心网站 (<https://nsidc.org/apps/itslive>) 下载获得,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- Ai S T, Wang Z M, E D C and Yan M. 2012. Surface movement research of arctic glaciers using GPS method. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 37(11): 1337-1340 (艾松涛, 王泽民, 鄂栋臣, 闫明. 2012. 利用GPS的北极冰川运动监测与分析. 武汉大学学报(信息科学版), 37(11): 1337-1340) [DOI: 10.13203/j.whugis2012.11.028]
- Benn D I, Fowler A C, Hewitt I and Sevestre H. 2019. A general theory of glacier surges. *Journal of Glaciology*, 65(253): 701-716 [DOI: 10.1017/jog.2019.62]
- Błaszczyk M, Jania J A, Cieplý M, Grabiec M, Ignatiuk D, Kolondra L, Kruss A, Luks B, Moskalik M, Pastusiak T, Strzelewicz A, Walczowski W and Wawrzyniak T. 2021. Factors controlling terminus position of Hansbreen, a tidewater glacier in Svalbard. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(2): e2020JF005763 [DOI: 10.1029/2020JF005763]
- Charrier L, Dehecq A, Guo L, Brun F, Millan R, Lioret N, Copland L, Maier N, Dow C and Halas P. 2025. TICOI: an operational Python package to generate regular glacier velocity time series. *The Cryosphere*, 19(10): 4555-4583 [DOI: 10.5194/tc-19-4555-2025]
- Friedl P, Seehaus T and Braun M. 2021. Global time series and temporal mosaics of glacier surface velocities derived from Sentinel-1 data. *Earth System Science Data*, 13(10): 4653-4675 [DOI: 10.5194/essd-13-4653-2021]
- Gardner A S, Greene C A, Kennedy J H, Fahnestock M A, Liukis M, López L A, Lei Y, Scambos T A and Dehecq A. 2025. ITS_LIVE global glacier velocity data in near-real time. *The Cryosphere*, 19(9): 3517-3533 [DOI: 10.5194/tc-19-3517-2025]
- Guo L, Li J, Li Z W, Wu L X, Li X, Hu J, Li H L, Li H Y, Miao Z L and Li Z Q. 2020. The surge of the Hispar Glacier, Central Karakoram: SAR 3-D flow velocity time series and thickness changes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(7): e2019JB018945 [DOI: 10.1029/2019JB018945]
- Guo W Q, Zhang Z, Wu K P, Liu S Y, Shangguan D H, Xu J L, Jiang Z L and Wang X. 2022. A review on the advances in surge-type glacier study. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 44(3): 954-970 (郭万钦, 张震, 吴坤鹏, 刘时银, 上官冬辉, 许君利, 蒋宗立, 王欣. 2022. 跃动冰川研究进展. 冰川冻土, 44(3): 954-970) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0091]
- Jouvet G, Weidmann Y, Seguinot J, Funk M, Abe T, Sakakibara D, Seddik H and Sugiyama S. 2017. Initiation of a major calving event on the Bowdoin Glacier captured by UAV photogrammetry. *The Cryosphere*, 11(2): 911-921 [DOI: 10.5194/tc-11-911-2017]
- Li J, Li Z W, Wu L X, Xu B, Hu J, Zhou Y S and Miao Z L. 2018. Deriving a time series of 3D glacier motion to investigate interactions of a large mountain glacial system with its glacial lake: use of Synthetic Aperture Radar Pixel Offset-Small Baseline Subset technique. *Journal of Hydrology*, 559: 596-608 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.02.067]
- Li R X, Li G J, Feng T T, Shen Q, Qiao G, Ye Z and Xia M L. 2022. A review of Antarctic ice velocity products and methods based on optical remote sensing satellite images. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(6): 953-963 (李荣兴, 李国君, 冯甜甜, 沈强, 乔刚, 叶真, 夏梦莲. 2022. 基于光学遥感卫星影像的南极冰流速产品和方法研究综述. 测绘学报, 51(6): 953-963) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20220168]
- Meier M F and Post A. 1969. What are glacier surges? *Canadian Journal of Earth Sciences*, 6(4): 807-817 [DOI: 10.1139/c69-081]
- Nolan A, Kochtitzky W, Enderlin E M, McNabb R and Kreutz K J. 2021. Kinematics of the exceptionally-short surge cycles of Sit' Kusá (Turner Glacier), Alaska, from 1983 to 2013. *Journal of Glaciology*, 67(264): 744-758 [DOI: 10.1017/jog.2021.29]
- Qin D H, Yao T D, Ding Y J and Ren J W. 2016. *Glossary of Cryospheric Science*. Beijing: China Meteorological Press (秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 任贾文. 2016. 冰冻圈科学辞典. 北京: 气象出版社)
- Raymond C F. 1987. How do glaciers surge? a review. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B9): 9121-9134 [DOI: 10.1029/JB092iB09p09121]
- Samsonov S, Tiampo K and Cassotto R. 2021. Measuring the state and temporal evolution of glaciers in Alaska and Yukon using synthetic-aperture-radar-derived (SAR-derived) 3D time series of glacier surface flow. *The Cryosphere*, 15(9): 4221-4239 [DOI: 10.5194/tc-15-4221-2021]
- Sevestre H and Benn D I. 2015. Climatic and geometric controls on the global distribution of surge-type glaciers: implications for a unifying model of surging. *Journal of Glaciology*, 61(228): 646-662 [DOI: 10.3189/2015JoG14J136]
- Van Wychen W, Bayer C, Copland L, Brummell E and Dow C. 2023. Radarsat constellation mission derived winter glacier velocities for the St. Elias Icefield, Yukon/Alaska: 2022 and 2023. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 49(1): 2264395 [DOI: 10.1080/07038992.2023.2264395]
- Yang L Y, Zhao C Y, Lu Z, Yang C S and Zhang Q. 2020. Three-dimensional time series movement of the Cuolangma glaciers, southern Tibet with sentinel-1 imagery. *Remote Sensing*, 12(20): 3466 [DOI: 10.3390/rs12203466]

Monitoring surge-type glacier velocities using Pixel Offset Tracking Small Baseline Subset method with Robust Trend-Outlier Decomposition

SHI Yueling^{1,2,3}, CHE Tao⁴, WANG Xiaowen⁵, LIU Guoxiang⁵,
MAO Wenfei⁵, WEI Chenchun¹, ZHANG Zhihua^{1,2,3}

1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China;

3. Key Laboratory of Science and Technology in Surveying & Mapping, Gansu Province (Lanzhou Jiaotong University), Lanzhou 730070, China;

4. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

5. Department of Surveying and Geo-Informatics, Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

Abstract: Conventional pixel offset tracking small baseline subset (SBAS) methods, including Multidimensional SBAS based on pixel offset tracking (PO-MSBAS) and Three-dimensional pixel offset tracking SBAS (3D PO-SBAS), suffer from severe outlier contamination when deriving 3D time-series velocities of surge-type glaciers. These outliers obscure true glacier motion and reduce the reliability of retrieved velocity fields, especially during rapid surge episodes. This study aims to develop a robust signal-processing strategy to identify and suppress outliers effectively, thereby improving the accuracy, continuity, and physical plausibility of 3D time-series velocity monitoring for surge-type glaciers.

This study proposes a Robust Trend-Outlier Decomposition (RTOD) algorithm that decomposes an original time series into trend, outlier, and residual components. RTOD first estimates a trend using an adaptive moving average whose window width depends on the series length. RTOD then performs an iterative two-step outlier detection on the detrended residuals: For each time point, it calculates the local median and the Median Absolute Deviation (MAD) within a local window (excluding the point itself and previously identified outliers). It computes two anomaly scores: one based on the raw MAD and the other based on the MAD scaled by 1.4826 (which provides a consistent estimate of the standard deviation). It flags a point as an outlier if either score exceeds a predefined threshold of 3.5. After detecting outliers, the algorithm reconstructs a cleaned signal using a variance-based decision rule: If the residual component has the largest variance contribution, the cleaned signal retains only the trend; otherwise, it retains both the trend and residuals. The RTOD algorithm is integrated into two frameworks: (1) RTOD-PO-MSBAS, where RTOD is applied to the Line of Sight (LOS) and azimuth displacement time series from ascending/descending Sentinel-1A/B synthetic aperture radar (SAR) images before constructing the sparse inversion matrix; and (2) RTOD-3D PO-SBAS, where RTOD is applied to the LOS and azimuth velocity time series after SBAS processing. Both methods then solve for cleaned 3D (east-west, north-south, and vertical) velocity time series. Validation uses 2018 – 2024 Sentinel-1A/B SAR data (286 descending and 176 ascending images) over the surge-type Osbornbreen Glacier, Svalbard, with cross-validation against Sentinel-2A/B optical velocities and the inter-mission time series of land ice velocity and elevation (ITS_LIVE) annual velocity products.

RTOD processing substantially suppresses outliers and improves agreement with independent datasets. On the western branch, compared with Sentinel-2 derived horizontal velocities, the correlation coefficient increases from 0.03–0.77 (traditional methods) to 0.15–0.98 (RTOD-based methods), and the interquartile range (IQR) drops from 35.45–717.26 to 33.59–142.42. On the eastern branch, the correlation coefficient rises from 0.01–0.27 to 0.47–0.80, and the IQR decreases from 140.07–3056.97 to 40.70–113.62. The annual velocity curves from RTOD-PO-MSBAS and RTOD-3D PO-SBAS show strong consistency with ITS_LIVE products, with differences mostly within 150 m/a (western branch) and 100 m/a (eastern branch). Furthermore, the cleaned 3D velocity maps (east-west, north-south, and vertical) exhibit spatially continuous, physically plausible patterns, effectively removing the fragmented, outlier-dominated fields produced by traditional methods.

The RTOD method effectively removes outliers from time-series velocity data of surge-type glaciers, substantially enhancing the reliability of 3D time-series monitoring. The proposed RTOD-PO-MSBAS and RTOD-3D PO-SBAS algorithms provide clean, continuous velocity signals while preserving true glacier motion trends. This approach not only supports high-quality studies of surge-type glacier dynamics but also offers a methodological reference for monitoring other large-magnitude surface displacements, such as landslides and debris flows.

Key words: surge-type glacier, glacier 3D time-series velocity, robust trend-outlier decomposition, PO-MSBAS, 3D PO-SBAS, Osbornbreen Glacier, Svalbard

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. U22A20565, 42406254, 42401535); Gansu Provincial Science and Technology Program (No. 23ZDKA0004); Youth Science and Technology Fund Project of Gansu Province (No. 24JRRA271); Tianyou Youth Talent Lift Program of Lanzhou Jiaotong University