

武汉大学学报(信息科学版)

*Geomatics and Information Science of Wuhan University*

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: GPS-IR 技术快速估计雪水当量  
作者: 王佳彤, 胡羽丰, 李振洪, 张成龙, 张苗苗, 杨璟, 姜万冬  
DOI: 10.13203/j.whugis20210199  
收稿日期: 2021-04-22  
网络首发日期: 2021-06-09  
引用格式: 王佳彤, 胡羽丰, 李振洪, 张成龙, 张苗苗, 杨璟, 姜万冬. GPS-IR 技术快速估计雪水当量. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20210199>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20210199

## GPS-IR 技术快速估计雪水当量

王佳彤<sup>1,2</sup> 胡羽丰<sup>1,2,3</sup> 李振洪<sup>1,2,3</sup> 张成龙<sup>1,2</sup> 张苗苗<sup>1,2</sup> 杨璟<sup>1,2</sup> 姜万冬<sup>1,2</sup>

1 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安, 710054

2 长安大学地学与卫星大数据研究中心, 陕西 西安, 710054

3 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安, 710054

**摘要：**雪水当量的监测对于气候变化的预测、水资源管理、农业生产规划具有重要意义。GPS 干涉反射技术(GPS interferometric reflectometry, GPS-IR)作为一种十分有效的地表积雪监测技术被日益重视。基于 GPS-IR 技术实现了一种雪水当量的快速估计方法。首先, 基于 GPS-IR 技术获取美国板块边界观测(the plate boundary observatory, PBO) GPS 站获取雪深时间序列; 然后, 利用美国积雪遥测(SNOWTElemetry, SNOTEL)站观测数据构建雪水当量转换模型; 最后, 以 ClimateNA (Historical and projected climate data for North America) 的气候预测数据作为参数约束, 将 GPS 日雪深向雪水当量快速转化; 并对雪水当量估计与验证过程的影响因素进行评价。实验结果表明: (1) 基于 GPS-IR 技术雪深序列具有良好可靠性, 与观测值的相关系数 ( $R^2$ ) 达到 0.98, 均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 为 11.1 cm, 偏差 (Bias) 为 -3.7 cm; (2) 快速转化模型对雪水当量估计有较高精度 ( $R^2=0.98$ , RMSE=4.2 cm, Bias=-2.5 cm) 与稳定性 (Std=3.0 cm); (3) 转化模型时空稳定性较高, 残差集中在 5 cm 内; (4) 气候预测数据的引入、积雪分布差异对雪水当量估计与验证影响较小。所提出的方法使积雪监测设备缺乏区域实现雪水当量快速估计, 同时也为现有积雪观测网络增强、积雪产品改善等研究提供参考。

**关键词：**GPS-IR; 积雪深度; 雪水当量; 快速估计

中图分类号: P237

文献标志码: A

收稿日期: 2021-04-22

资助项目: 国家自然科学基金(41941019, 41904020); 陕西省自然科学研究计划项目(2020JQ-350); 陕西省科技创新团队(2021TD-51); 中央高校基本科研业务费专项资金(300102260301, 300102261108, 300102261404); 中欧合作龙计划 5 (59339)。

第一作者: 王佳彤, 硕士生, 研究方向为 GNSS-IR 积雪监测。jiatong\_wang417@163.com

通讯作者: 胡羽丰, 博士, 讲师。yfhu@chd.edu.cn

李振洪, 博士, 教授。zhenhong.li@chd.edu.cn

季节性积雪是地表气候与水文研究的重要组成部分<sup>[1]</sup>,同时也是很多地区的基础水资源<sup>[2]</sup>。雪水当量,即融雪的液体深度,是积雪的主要特征之一,同时也是融雪径流预报、水资源管理等方面的重要指标<sup>[3]</sup>。传统直接测取雪水当量的成本十分昂贵<sup>[4]</sup>,因此,大多数研究与应用选择通过经验模型,利用积雪深度估计雪水当量<sup>[5]</sup>。目前对于季节性的融雪监测,主要为雪季过后的雪水当量反演估计,难以满足部分应用对于雪水当量时效性的需求。

2009年,Larson等<sup>[6]</sup>首次展示利用大地测量GPS系统来估测雪深,该技术通过常规的单天线GPS观测数据,利用多路径效应实现近地空间水环境监测<sup>[7]</sup>。自Larson等提出GPS干涉反射(GPS interferometric reflectometry, GPS-IR)技术在积雪深度监测上的应用以来,诸多学者进行了验证与尝试,如Hefy等<sup>[8]</sup>在中欧地区进行了积雪深度估计;金双根等<sup>[9]</sup>在格陵兰岛进行积雪深度估计的尝试等。传统气象站的监测范围约10m<sup>2</sup>,相比之下GPS-IR技术具有更大的监测范围,其空间覆盖范围取决于天线高度,2m高的天线有1000~2000m<sup>2</sup>监测范围<sup>[10-11]</sup>,监测精度在分米级(通常为1dm)。该技术使得在全球广泛分布的GPS基站<sup>[12]</sup>能有效丰富现有的积雪观测网络。

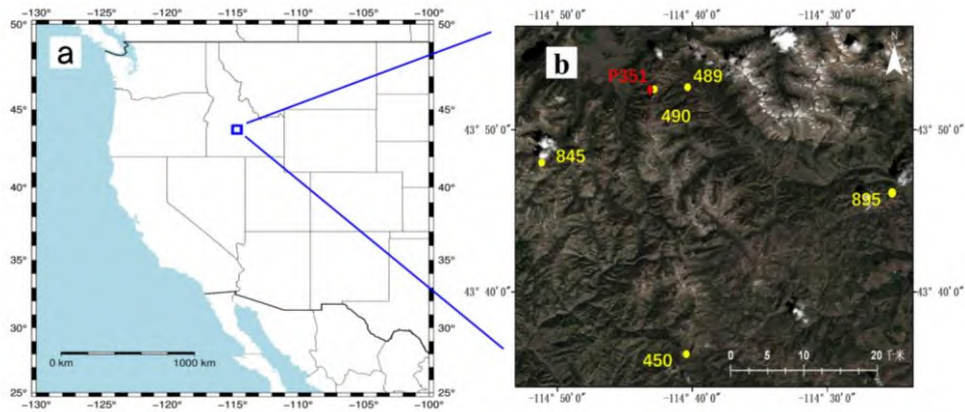
积雪融化过程较为复杂,通常受到温度、降水、海拔等诸多因素的影响<sup>[13]</sup>。Meløysund<sup>[14]</sup>通过在挪威的105个监测点,分析了相对湿度、气压、降雨及日照时数等因素对雪密度变化的影响。McCreight等<sup>[4]</sup>利用积雪深度的长时间序列异常和短时间正负异常值分别模拟出雪密度,进而对雪水当量进行估计。Hill等<sup>[15]</sup>通过逐步线性回归得到温度、降水对雪水当量估计有较大影响,并通过非线性分段模型获得了较好的雪水当量估计效果。因此,在构建模型时考虑到气候变量对于雪水当量估计的影响,可以更合理解释积雪变化过程。

随着GPS-IR技术的发展,利用GPS站实现雪水当量监测成为了新的尝试。如2014年,Jacobson等<sup>[16]</sup>利用GPS-IR技术对积雪深度与积雪密度进行拟合处理,并对获得的雪水当量质量进行评估。同年,McCreight等<sup>[17]</sup>利用雪密度模型,结合美国板块边界观测(the plate boundary observatory, PBO)网络数据,验证了基于GPS-IR技术雪水当量估计的可靠性。目前,基于GPS-IR技术雪水当量估计一般是在雪季过后对雪水当量进行反演,时效性较差。本文利用GPS-IR技术,考虑气候变量对于雪水当量转化的影响,建立可用于雪水当量的转换模型,实现积雪监测设备缺乏区域的雪水当量快速估计,为增强现有的积雪观测网络,改善现有积雪产品,提供高时效性雪水当量估计的研究提供参考。

## 1 实验区域与数据来源

### 1.1 实验区域概况

本文选取美国西北部爱达荷州Ketchum部分地区作为实验区域(见图1)。该区域属于落基山脉,平均海拔约2400m,属于温带大陆性气候,年平均温度约12℃,年平均降水约300mm<sup>[18]</sup>。该区域普遍存在季节性积雪,适合进行积雪参数变化的研究调查。实验区域包含GPS站与气象监测站P351(红色标识)和5个SNOTEL站(黄色标识)(图1)。



(a) 实验区域位置示意

(b) 实验区域内测站分布

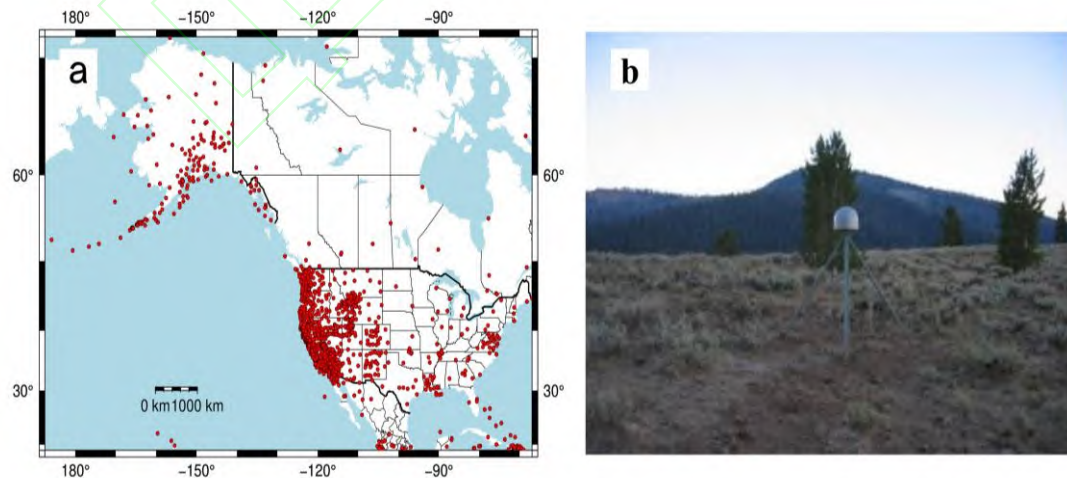
图 1 研究区域地理位置及 GPS 和气象测站分布情况

Fig.1 Location of the Study Area with GPS and SNOTEL Stations

## 1.2 GPS 数据

实验 GPS 数据来源于美国板块边界观测项目(the plate boundary observatory, PBO), 该项目将 GNSS(global navigation satellite system)基站、钻孔应变观测点与激光应变观测点布设在北美大陆西部形变地区, 用于研究板块形变<sup>[19]</sup>。其 GNSS 站往往位于荒地、季节性积雪及临海区域, 可以提供长期稳定可靠的 GNSS 数据, 其测站分布情况如图 2 (a) 所示。

本文选用 PBO 的 P351 站 (图 2 (b)), 位于美国西北部爱达荷州中部山区, 使用的接收机类型为 TRIMBL ENETRS, 接收天线型号为 TRM29659.00, 周围视野开阔, 无明显遮挡物 (图 2 (b))。



(a) PBO 网络测站分布

(b) P351 站观测环境

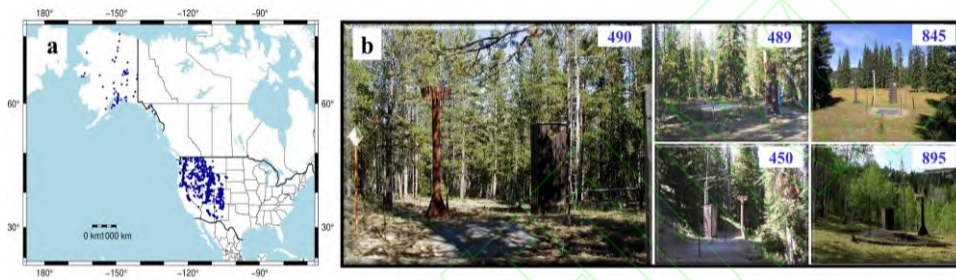
图 2PBO 网络测站分布情况和 P351 站观测环境

Fig.2 Distribution of PBO GPS Stations and Observation Environment of P351 Station

### 1.3 实测气象数据

积雪遥测 (SNOWTElemetry, SNOTEL) 网络是由美国农业部与自然资源保护服务组织在美国西部偏远地区建立的自动化气象监测系统, 其站点分布情况如图 3 (a) 所示。SNOTEL 网络能够提供雪深、雪水当量、温度、降水量等气象监测数据。

实验区域内 SNOTEL 站环境如图 3 (b) 所示, 其位置信息 (含 P351 站) 如表 1 所示, 其中 450 站与 P351 站相距最远, 约为 31km, 相距最近的为 490 站, 约为 0.41 km。P351 的海拔高度约为 2 700 m, 与 P351 站海拔差异最小的为 845 站, 相差约 16 m, 差异最大的站约 769 m。



(a) SNOTEL 网络站点分布

(b) 本文选择的 SNOTEL 站站点情况

图 3 SNOTEL 网络

Fig.3 SNOTEL Network

表 1 P351 及 SNOTEL 站位置信息

Tab.1 Information About P351 and SNOTEL Stations

测站	经度/(°)	纬度/(°)	海拔/m	与 P351 站 高差/m	距 P351 距离/km
P351	-114.719	43.874	2692.61	—	—
450	-114.674	43.603	2676.14	-126.19	30.86
489	-114.672	43.877	2731.01	-415.75	3.81
490	-114.714	43.875	2566.42	-16.46	0.41
845	-114.853	43.799	1923.29	38.40	13.39

### 1.4 ClimateNA 项目

参与实现雪水当量估计的气候预测数据来源于北美历史与预测气候数据项目 (Historical and projected climate data for North America, ClimateNA) (<http://climatena.ca>), 该项目统计了大量 (大于 200) 月、季和年气候变量数据, 使用无标度数据作为基线, 对 1901-2100 年之间的历史和未来气候变量进行了统计与预测, 数据范围覆盖北美地区 (西经  $52.625^{\circ} \sim 179.17^{\circ}$ , 北纬  $14.45^{\circ} \sim 83.203^{\circ}$ ), 其空间分辨率为  $1 \text{ km}^{[20-21]}$ 。

该项目可结合大气环流模型生成如降水、温度、相对湿度、无霜期等气候变量预测网格数据。Wang等<sup>[21]</sup>在2016年提出了对如何计算相关网格做出了解释。图4给出了实验地区冬季(12月-2月)降水积累量(winter precipitation, PPTWT) (单位: mm)和最暖月平均温度与最冷月平均温度之间的温差 (temperature difference, TD) (单位:  $^{\circ}\text{C}$ )的气候预测网格数据, TD常用来表征地区气候受大陆影响的程度。

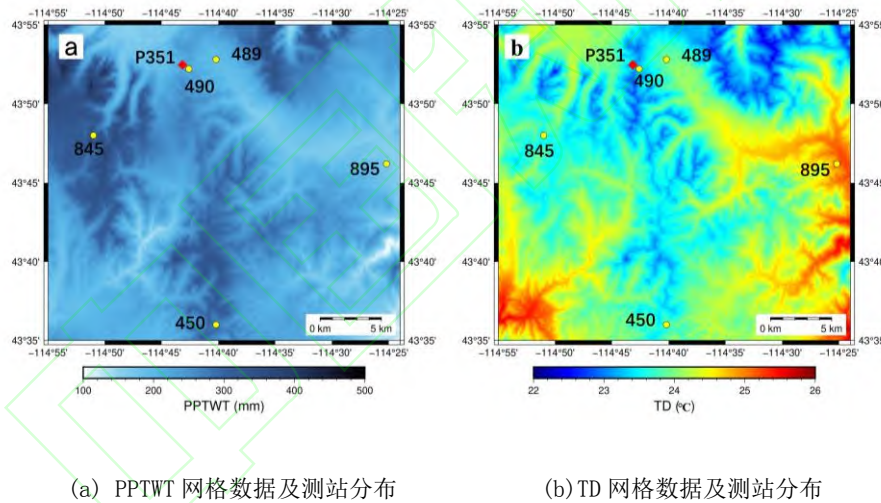


图 4 研究区域气候预测网格数据

Fig. 4 Predicted Climate Grid Data over the Study Area

## 2 实验方案

### 2.1 GPS 雪深测量

Larson 等<sup>[7, 22]</sup>介绍了 GPS-IR 的原理及其在积雪深度测量上的应用 (见图 5), 并提供了 GPS-IR 数据处理工具<sup>[23]</sup>。GPS-IR 技术基于多路径效应, 主要对低卫星仰角信噪比数据 (signal noise ratio, SNR) 进行分析, 获取卫星上升或者下降时的多路径频率变化信息。这种频率变化取决于天线与反射面之间的垂直距离, 当忽略直射信号的贡献, 单颗卫星信号的信

噪比数据可以表示为<sup>[24]</sup>：

$$\text{SNR}(e) = A(e) \sin\left(\frac{4\pi H_R}{\lambda} \sin e + \Phi\right) \quad (1)$$

式中， $e$ 表示 GPS 卫星的仰角； $\lambda$ 为信号载波波长； $\Phi$ 为相位常数； $H_R$ 为 GPS 天线相位中心相对水平反射面之间的垂直距离； $A(e)$ 表示 SNR 数据的振幅。当以 $\sin e$ 为自变量，则多路径频率可表示：

$$f = \frac{2H_R}{\lambda} \quad (2)$$

通过确定频率 $f$ ， $H_R$ 可表示为：

$$H_R = \frac{f\lambda}{2} \quad (3)$$

将信噪比序列通过多项式拟合去除趋势项，并对信噪比残差序列进行 Lomb-Scargle 周期图分析 (LSP) 获得其频谱。然后取频谱峰值对应的频率  $f$ ，并通过式 (3) 获得  $H_R$ 。获取  $H_R$ 后，则积雪深度 $h_s$ 可以表示为：

$$h_s = H - H_R \quad (4)$$

这里的  $H$ 为基站高度，但实际上因地表植被覆盖、地面起伏以及其他的因素可能导致实际固定高度与预设高度存在差异，所以通常  $H$ 取深秋无雪期（一般为 30d）计算的平均高度。

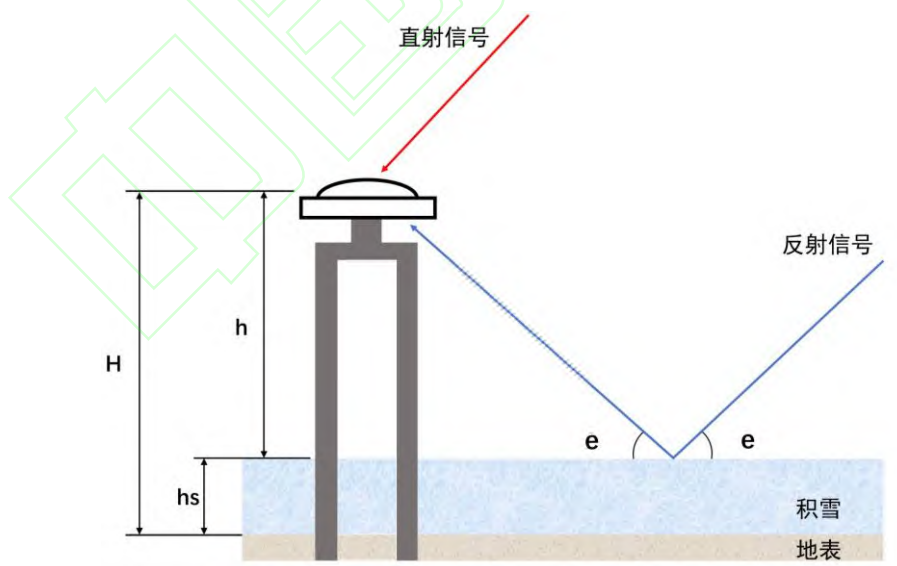


图 5 陆基 GPS-IR 几何模型

Fig. 5 Geometry of Ground-based GPS-IR

本文降雪深度采用为每日可用地面轨迹计算得到的积雪深度均值。利用 P351 站位置信

息以及 GPS 卫星分布情况绘制信号反射区域（第一菲涅尔区），并结合 DEM（digital elevation model）数据选择卫星仰角为  $8^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 。如图 6 (a) 显示为  $8^{\circ}$ 、 $15^{\circ}$  与  $25^{\circ}$  信号反射区域，以不同颜色的椭圆来表示不同卫星的地面轨迹。随着仰角的增加，反射点会向天线靠近。由于纬度以及 GPS 卫星的倾角导致 P351 站北面部分区域没有卫星轨迹，反射区域覆盖面积约  $2000 \text{ m}^2$ （见图 6(b)）。

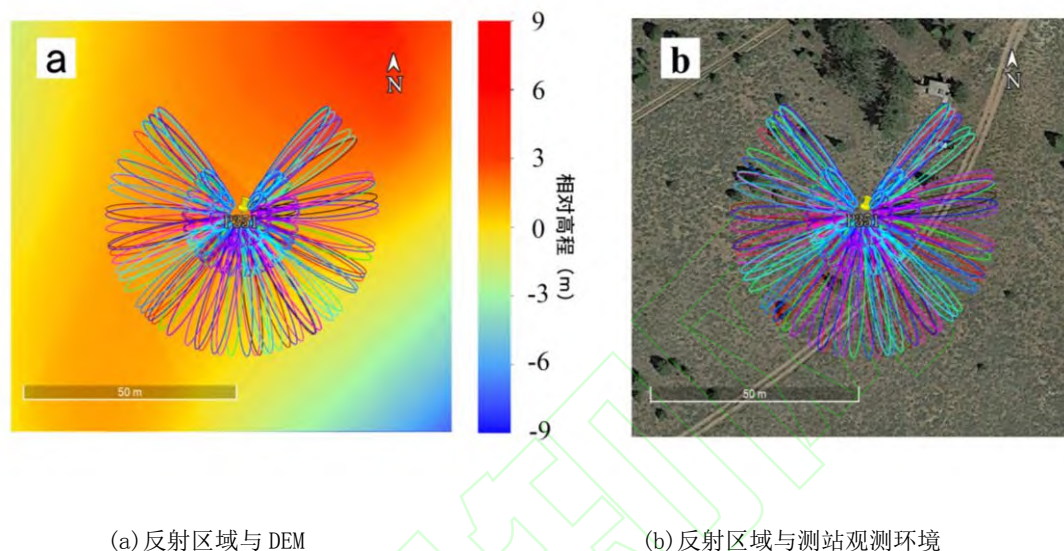


图 6 P351 站 GPS 信号反射区域示意图

Fig.6 Schematic Diagram of GPS Signal Reflection Area Around P351 Station

## 2.2 雪水当量快速估计

### 2.2.1 参数回归

许多应用需要有关雪水当量的信息，但雪水当量的直接测量普遍存在耗时长、成本高的缺点。因此利用雪深数据，通过经验模型实现雪水当量的估计成为了研究人员的普遍选择。

许多研究表明，单个方程可以表达积累阶段积雪的密实化过程，但在消融阶段表现不佳，且对于雪水当量转化，仅靠积雪深度难以完整描述<sup>[25]</sup>。图 7 显示了一个典型的水文年内，雪水当量随积雪深度变化的概念图<sup>[26]</sup>，可以看出每个雪深值对应着 2 个雪水当量值，实际情况可能会对应更多值。这是因为积雪在水文年内密度一直在增加，对于相同深度的积雪，存在不同的积雪密度，对应了不同的雪深当量值，因此产生了一个滞后环。所以根据积雪性质对雪水当量变化按积累与消融阶段分开描述更为合理。

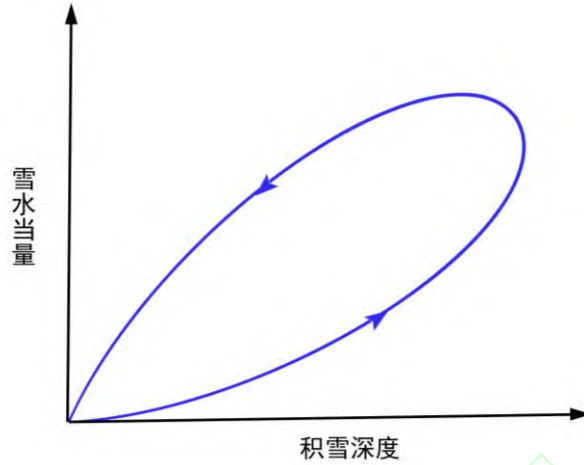


图7 雪水当量随积雪深度变化示意图<sup>[26]</sup>

Fig.7 Conceptual Relationship Between SWE and Snow Depth<sup>[26]</sup>

Hill 等<sup>[27]</sup>提出了一个简单的模型对北半球冬季(12月-2月)降水的雪深( $h$ )、冬季降水(PPTWT)以及最暖月份的平均温度和最冷月份的平均温度之间的差值(TD)、水文年年积日(day of year, DOY)(从水文年第一天起算)进行回归,获得积雪堆积和消融阶段的独立方程(式5),并对该模型在美国东北与北美西北部的数据集中验证其可靠性,并与其他2种不同复杂程度的转换模型进行比较,结果表明该模型具有最好的转换结果。

$$\begin{cases} \text{SWE}_{\text{acc}} = Ah^{a_1} \text{PPTWT}^{a_2} \text{TD}^{a_3} \text{DOY}^{a_4}, & \text{DOY} < \text{DOY}^* \\ \text{SWE}_{\text{abl}} = Bh^{b_1} \text{PPTWT}^{b_2} \text{TD}^{b_3} \text{DOY}^{b_4}, & \text{DOY} > \text{DOY}^* \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\text{DOY}^*$ 表示雪水当量峰值对应的水文年年积日;为简化模型的复杂程度,在这里采用多测站多年份  $\text{DOY}^*$ 的平均值;  $\text{SWE}_{\text{acc}}$ 、 $\text{SWE}_{\text{abl}}$ 分别表示堆积与消融时期的雪水当量估计值。但式(5)这样的分段方程会导致积累期与消融期在  $\text{DOY}^*$ 这一天的估值可能不同,即这两个方程在  $\text{DOY}^*$ 是不连续的,需将其平滑地混合在一起,以产生最终模型,公式如下:

$$\text{SWE} = \text{SWE}_{\text{acc}} \frac{1}{2} (1 - \tanh h[0.01\{\text{DOY} - \text{DOY}^*\}]) + \text{SWE}_{\text{abl}} \frac{1}{2} (1 + \tanh h[0.01\{\text{DOY} - \text{DOY}^*\}]) \quad (6)$$

式中,  $\tanh$ 函数中的系数0.01控制混合窗口的宽度,用来减小模型估计结果的均方根误差。

在Hill 等的实验中,用于参数回归的气候变量来源于ClimateNA项目,意在解决缺乏气候资料地点的雪水当量的反演。本文旨在进行快速的雪水当量估计,选择了SNOTEL站提供的更为准确的气候监测数据。同时为降低模型的复杂程度,在参数回归的过程中采用了PPTWT、TD、 $\text{DOY}^*$ 的均值,具体见表2。

表 2 SNOTEL 站气候变量观测值

Tab.2 Climate Observed Variables of SNOTEL Stations

测站	PPTWT/mm	TD/°C
450	292	21.7
489	254	21.1
490	292	21.9
845	417	21.1
895	185	22.8

2.2.2 估计 方案

Hill 等提出的模型在对雪水当量进行估计时，需要完整度过整个冬季之后，才会有冬季降水（PPTWT）与温度差值（TD）的统计数据，使对于雪水当量的估计产生了近一个水文年的时延，难以满足部分应用对于雪水当量数据时效性的需求。

表 3 为利用 ClimateNA 项目得到的各测站位置的气候预测数据，数据采取了多个大气环流模型的均值。通过 § 2.2.1 得到区域模型参数以及 GPS 站点的气候预测数据，可将 GPS 日积雪深度转换为日雪水当量，相对于传统气象站，兼具了 GPS 站大范围覆盖、高时空分辨率的特点，流程如图 8 所示。

表 3 ClimateNA 气候变量预测值

Tab.3 Climate Predicted Variables of ClimateNA

测站	PPTWT/mm	TD/°C
P351	287	24.4
450	321	24.9
489	243	25.0
490	283	24.5
845	417	24.9
895	219	26.6

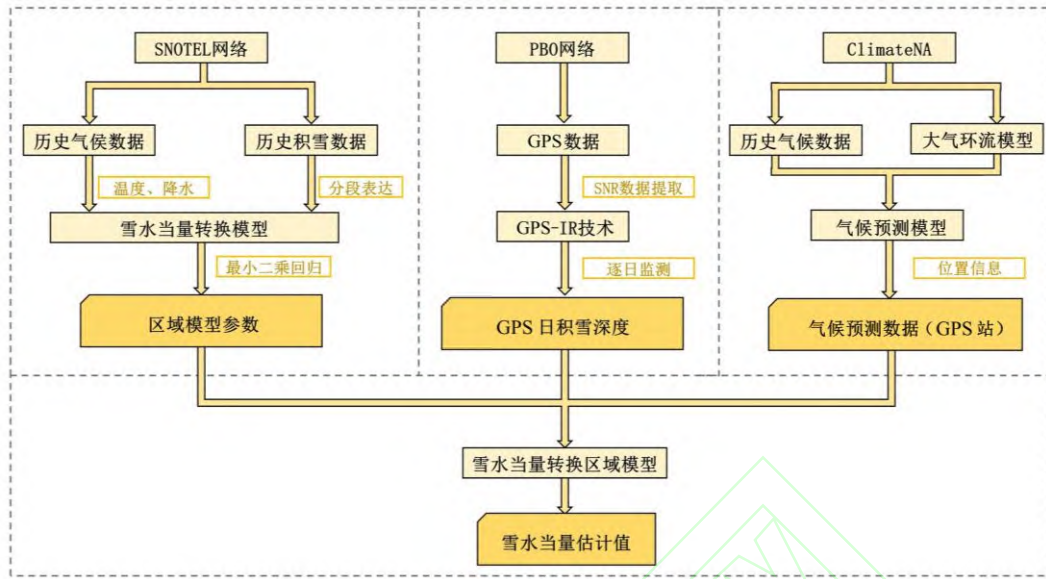


图 8 雪水当量快速估计流程图

Fig. 8 Flowchart of Rapid Estimation of SWE

### 3 实验结果

#### 3.1 精度指标

本文选取均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 和偏差 (Bias) 作为结果精度评定指标, 其定义分别为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (7)$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) \quad (8)$$

式中,  $\hat{y}_i$  为估计值;  $y_i$  为观测值;  $n$  为水文年天数。

#### 3.2 GPS 雪深测量结果

进行积雪深度计算前, 选取深秋 (30 d) P351 站的 GPS 数据进行与积雪监测相同的数据处理, 得到深秋裸地的反射高度约为 1.97 m, 设置为 P351 站固定高度。

通过 GPS-IR 技术获取 P351 站 2015 年水文年的积雪时间序列, 并与 P351 站最近的 SNOTEL 站 (490 站) 雪深监测数据进行对比 (见图 9)。

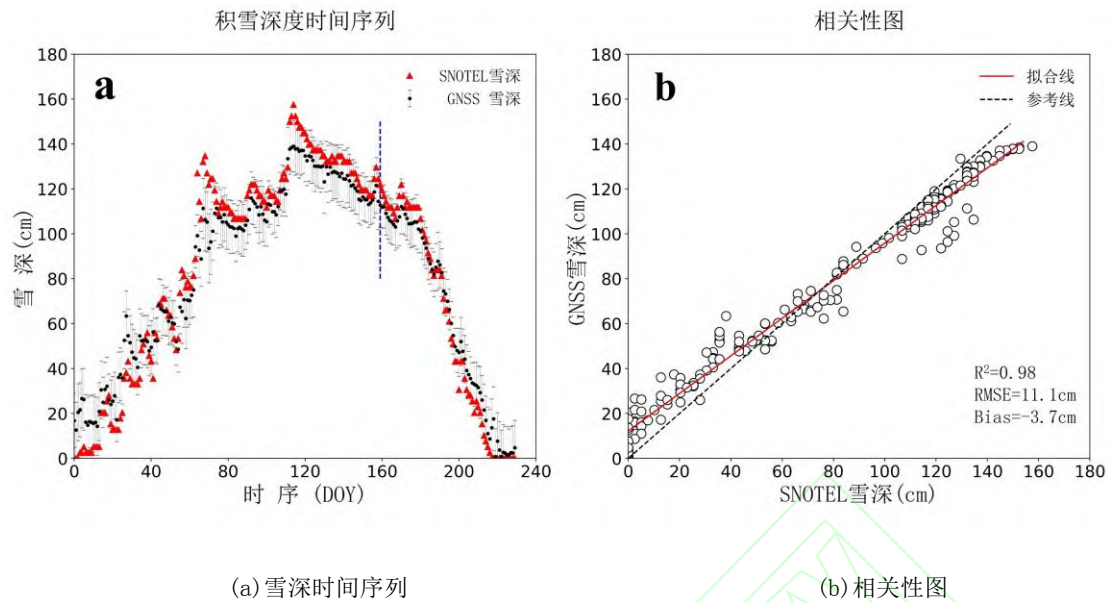


图 9 GPSP351 站雪深与 SNOTEL 490 站雪深对比

Fig.9 Comparison Between GPS P351 and SNOTEL 490 Snow Depths

如图 9 (a) 所示, P351 站 GPS 雪深与 490 站实测结果在时间序列上表现出良好的符合度。图 9 (b) 中给出了 GPS P351 站雪深与 SNOTEL 490 站雪深相关性图, 结果显示 P351 测站 GPS 雪深估测值能够提供其覆盖范围内的可靠测量 ( $R^2=0.98$ ,  $RMSE=11.1$  cm,  $Bias=-3.7$  cm), 其中黑色直线为斜率为 1 的参考线, 红色为拟合直线, 可以看出 GPS 雪深整体存在一定负偏差。GPS 日雪深的标准差均值约 10.1 cm, 说明 GPS-IR 技术对于日均雪深有较为稳定的监测效果。以 490 站雪水当量峰值对应的水文年年积日 (DOY 159) (图 9 (a) 中蓝色虚线) 将 P351 站分为积雪期与消融期, 可以发现 GPS 雪深结果与 SNOTEL 数据差异主要集中在积雪期初期、积雪变化较大及积雪峰值附近。

地表植被可造成 GPS 反射信号漫反射, 在雪季初期尤为明显<sup>[28]</sup>。如 (DOY 0—40) 漫反射导致信号干涉效果减弱, 使得式 (3) 中的显著频率  $f$  的峰值降低, 进而由式 (4) 可解释实验中 GPS 雪深产生约 15 cm 的正偏差。降雪后表层积雪的积雪密度较小, GPS 信号会穿透表层松散积雪, 从积雪内部或底层的土壤反射上来, 导致 GPS-IR 的反演值产生相应的负偏差, 如在 DOY 65—69, 存在明显的降雪过程, 累计降雪约 46 cm, GPS 雪深偏差约 -26 cm。随着积雪密实化程度加深, 积雪密度不断增大, 使得 GPS 信号在积雪消融期会有更好的反射效果。分别比较积累期与消融期积雪变化, 结果显示消融期 ( $RMSE=9.6$  cm,  $Bias=2.3$  cm) 比积累期 ( $RMSE=12.6$  cm,  $Bias=-6.0$  cm) 有着更好的监测效果。

在 DOY 119, 雪深达到雪季最大值, GPS 雪深约  $(136 \pm 9)$  cm, 产生约 21 cm 的负偏差。造成这一现象的一个原因是在 DOY 113 至 DOY 119 有着明显的降雪; 另一个原因为 GPS-IR 用于雪深测量产生的系统误差。Nievinski 与 Larson 等<sup>[29]</sup>发现积雪表面与天线相位中心距在 50 cm (两个波长) 内时, 随着积雪深度的增加菲涅尔区面积会有明显的缩减, 这种变化会使得反射点覆盖面积减少近 30%。因此, 理论上, 在 P351 站超过 1.47 m 以上的积雪监测会

受到一定影响，这与对比结果相符。

### 3.3 雪水当量快速估计结果

#### 3.3.1 模型参数回归结果

结合 Hill 提出的结合气候的雪水当量转化模型，本文利用 P351 站附近的 5 个 SNOTEL 站 2011—2014 年水文年的积雪深度、雪水当量、冬季温差及降水量等数据对式 (5) 的模型参数进行回归，得到积雪期、消融期两组参数： $(A, a_1, a_2, a_3, a_4) = (0.0551, 0.9913, 0.1481, -0.1978, 0.3112)$ ， $(B, b_1, b_2, b_3, b_4) = (0.0071, 0.9933, 0.0602, -0.3683, 0.9247)$ 可以看出， $a_1$  与  $b_1$  相对较大，这可以反映出，对于雪水当量的变化，积雪深度占主导因素； $a_2$  和  $b_2$  都大于零，PPTWT 与雪水当量正相关；相比之下， $a_3$  和  $b_3$  都小于零，因此对于  $h$ 、DOY 和 PPTWT 相等的两个地点，TD 越大，也就是越趋近大陆性气候的地点，积雪密度越低。Sturm 等<sup>[30]</sup>在 2010 年曾对气候对于雪的密实化过程的影响进行过探讨，上述模型参数在描述积雪变化过程中，有着相近的结果。

#### 3.3.2 雪水当量估计结果

通过 § 3.2.1 获取的雪水当量转换模型，利用 ClimateNA 项目获取的 2015 年 P351 站点位置的 PPTWT、TD 预测数据（见表 2），将 GPS 雪深数据转化为雪水当量估计值。在对于 P351 站雪水当量估计时，未度过完整冬季，故 DOY\*取模型参数回归时的均值（DOY176）。将估计结果与距离最近的 SNOTEL490 站雪水当量数据进行比较，结果如图 10 所示。

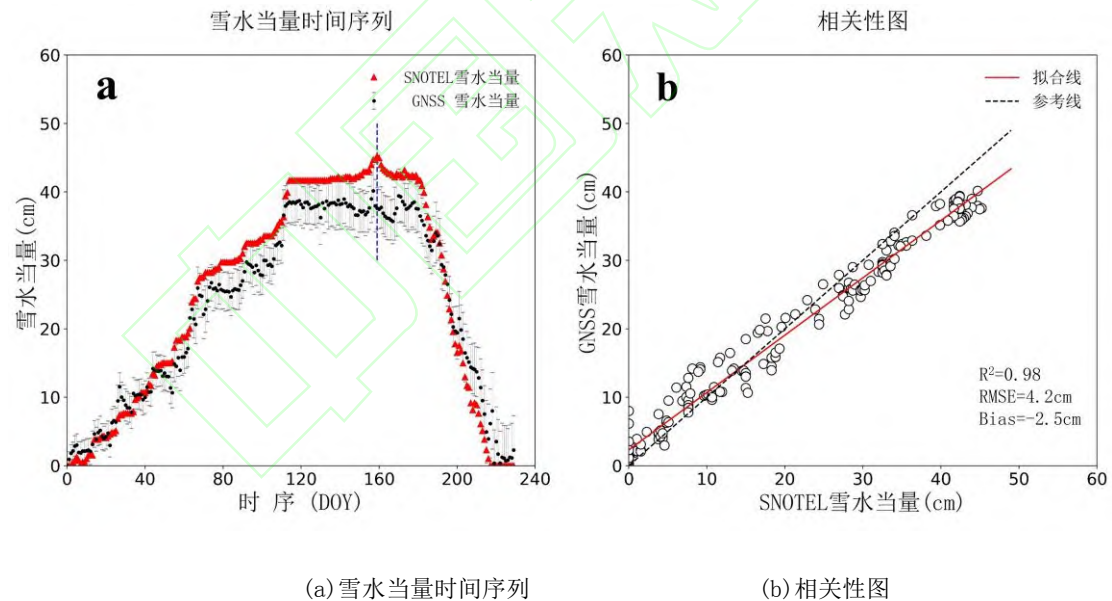


图 10 P351 雪水当量与 490 站雪水当量对比

Fig.10 Comparison Between GPS P351 and SNOTEL 490 SWEs

结果表明，通过快速转换模型得到的雪水当量具有较高可靠性 ( $R^2=0.98$ ,  $RMSE=4.2$  cm,  $Bias=-2.5$ cm)，并且雪季的日雪水当量的估计标准差均值为 3.0 cm，说明实现快速转换模型有稳定的估计性能。

雪水当量峰值出现在 DOY 159 (44.7 cm, 图 10 (a) 中蓝色虚线), GPS 雪水当量为(39.7±5.0) cm。从图 10(a)中可以看出, 雪水当量估计对比差异的分布情况与雪深估计对比差异分布情况大致相同, 集中在积雪积累初期、消融末期以及积雪峰值附近, 并伴随着几次显著降雪有着明显波动。

在有明显的积雪变化的阶段 (DOY 65—110), 对于雪水当量的估计产生偏小的估计, 偏差约-4.7 cm。在雪水当量峰值阶段 (DOY 150—170) 产生约-5.7cm 的偏差。雪季末期雪水当量产生相应的正偏差, 雪季初期 (DOY 1—15) 偏差约为 1.7cm, 末期约为 4.6cm, 雪季初期的估计偏差要小于末期。分别比较积雪期与消融期雪水当量估计值, 结果表明积雪期的对比差异 (Bias=-2.7cm) 要小于消融期 (Bias=3.7 cm)。

## 4 讨论

### 4.1 雪水当量估计误差

§ 3.2 的实验结果表明, 结合气候预测变量的雪水当量转化模型可以有效地将日积雪深度转化为雪水当量, 这里讨论雪水当量估计中的几个主要误差来源。

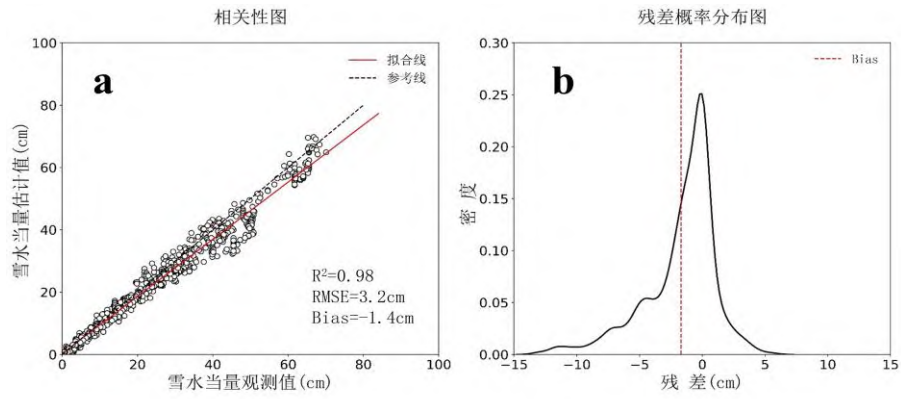
#### 4.1.1 雪水当量转换模型的精度

为了验证转化模型的精度, 本文利用 SNOTEL 站雪深、气候实测数据, 对 SNOTEL 站雪水当量进行估计并进行原位对比 (见图 11)。

由图 11 (a) 可知, 转换模型在 SNOTEL 站有着良好的转换效果、可接受的实验偏差 ( $R^2=0.98$ , RMSE=3.2 cm, Bias=-1.4 cm), 数据整体趋势 (红色直线) 较为接近斜率为 1 的参考线 (黑色虚线)。图 11 (b) 为对比残差的概率密度分布情况, 可以看出残差主要分布于-5~5 cm, 其概率密度峰值接近 0 cm。以红色虚线表示出对比结果的 Bias, 与峰值接近, 曲线整体较为平滑, 在-10~-5 cm 有小范围波动。

表 4 给出了各 SNOTEL 站雪水当量估计原位对比结果。可以看出, 模型在各站存在较小的负偏差, 其中 450 站估计偏差最大, 895 站估计偏差最小。将各测站原位对比残差时间序列表示如图 12 所示, 可以看出模型在 489、490、845、895 站估计残差分布相对均匀, 且在 450 站的估计结果在 DOY 120—200 产生较明显的负偏差, 导致图 11 (b) 中曲线在-10~-5 cm 范围内产生了相应的波动。

另外, 由图 12 可知, 对比残差在消融期波动要大于积雪期。在进行雪水当量估计时, 雪水当量峰值对应水文日采用的均值 (DOY\*=176), 使得参与雪季消融期模型参数回归的数据比积累期少近 53%, 模型对于积雪期雪水当量估计更为稳健, 导致了 § 3.3 中消融期 GPS 雪深估计精度好而转化为雪水当量时精度下降的问题。



(a) 相关性图

(b) 残差概率密度分布图

图 11 结合 SNOTEL 气候变量的雪水当量估计值与观测值对比结果

Fig. 11 Comparison Between the SWEs Predicted with SNOTEL Climate Data and the in-situ SWEs

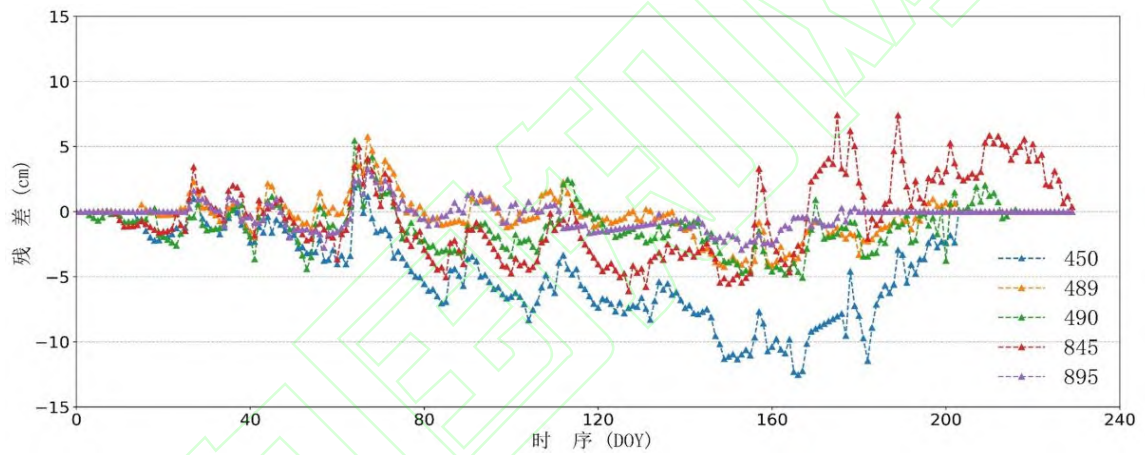


图 12 结合 SNOTEL 气候变量的雪水当量估计值与原位观测值对比差值时间序列

Fig. 12 Time Series of the Differences Between the SWEs Predicted with SNOTEL Climate Data and the in-situ SWEs

表 4 结合 SNOTEL 气候变量的雪水当量估计值与原位观测值对比结果

Tab. 4 Comparison Between the SWEs Predicted with SNOTEL Climate Data and the in-situ SWEs

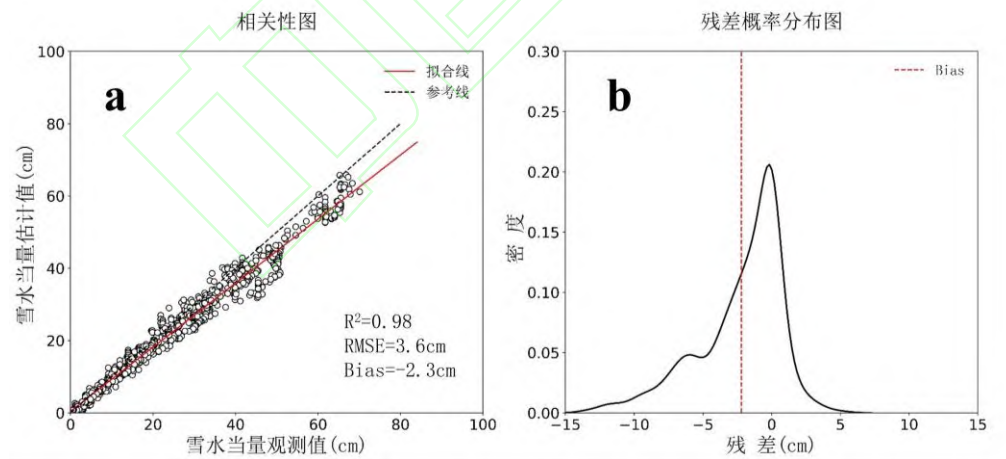
测站	$R^2$	RMSE/cm	Bias/cm
450	0.99	5.9	-4.2
489	0.98	1.6	-0.4

490	0.99	2.0	-1.2
845	0.99	3.1	-0.4
895	0.98	1.0	-0.3

#### 4.1.2 引入气候预测数据的影响

为探究雪水当量估计过程中气候预测数据引入的影响,本文利用 SNOTEL 雪深监测数据、ClimateNA 的气候预测数据,对 SNOTEL 站雪水当量进行估计并进行原位对比(见图 13)。对比结果显示,通过引入气候预测数据后模型仍具有较好的估计精度( $R^2=0.98$ ,  $RMSE=3.6\text{cm}$ ,  $Bias=-2.3\text{cm}$ )。相较图 11(a),图 13(a)中的整体趋势(红色直线)偏离斜率为 1 的参考线(黑色虚线),雪水当量估计精度有所下降。比较表 2 与表 3 中气候变量数据可发现,在实验区域 PPTWT 的实测值与预测值基本一致(均值相差约 8 mm),而 TD 均值相差约 3 °C,相对误差较大。由 § 3.2.1 可知,模型中 TD 指数  $a_3$ 、 $b_3$  均小于零,这使得当 TD 产生偏大估计时,雪水当量产生的估计偏小。

表 5 给出了各 SNOTEL 站的原位对比结果,与表 4 差异较小。图 13(b) 给出了对比残差的概率密度曲线,残差主要分布在 -5~5 cm;相较图 11(b),密度峰值有所下降,并且 Bias(红色虚线)远离残差密度峰值;在 -10~-5 cm 内较图 11(b)有更为明显的波动。各站点的残差时序如图 14 所示,对比图 12,在 DOY 120-200 的估计残差整体中有一定的负增长,这也导致图 13(b)中产生上述的波动。



(a) 相关性图

(b) 残差概率密度分布图

图 13 结合 ClimateNA 气候变量的雪水当量估计值与观测值对比结果

Fig.13 Comparison Between the SWEs Predicted with ClimateNA Climate Data and the in-situ SWEs

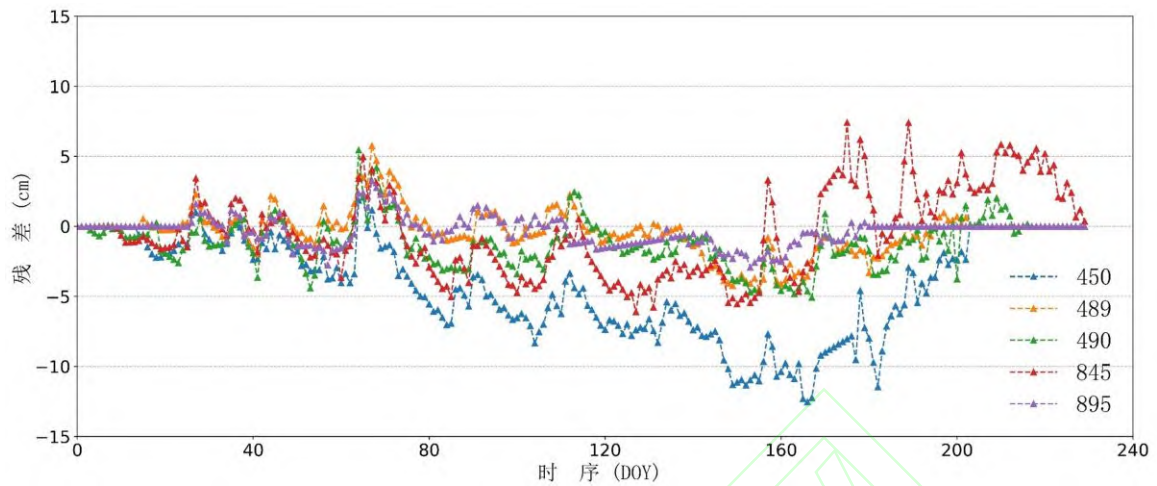


图 14 结合 ClimateNA 气候变量的雪水当量估计值与原位观测值对比差值时间序列

Fig.14 Time Series of the Differences Between the SWEs Predicted with ClimateNA Climate Data and the in-situ SWEs

表 5 结合 ClimateNA 气候变量的雪水当量估计值与原位观测值对比结果

Tab.5 Comparison Between the SWEs Predicted with CliamteNA Climate Data and the in-situ SWEs

测站	$R^2$	RMSE/cm	Bias/cm
450	0.98	5.9	-4.5
489	0.98	2.6	-1.4
490	0.99	2.7	-1.8
845	0.99	4.0	-2.5
895	0.98	1.1	-0.3

#### 4.1.3 GPS 与 SNOTEL 测站的空间差异产生的影响

为探究实验区域内积雪的空间分布差异对 § 3.3.2 中验证过程的影响，利用 P351 站雪深监测数据、各 SNOTEL 站气候变量观测值估计雪水当量，并与各站实测值进行对比。由表 6 的对比结果可以看出，450、489、490 站的对比结果相对较好；与 P351 高差、距离差异最

小的 490 站取得了最好的对比结果。原位对比残差相对较小（-10~10 cm），变化趋势也较为稳定（见图 15），说明 P351 站与 490 站积雪分布的空间差异对验证过程影响较小。

表 6 结合 P351 站雪深与 SNOTEL 站气候变量的雪水当量估计值与原位观测值对比结果

Tab. 6 Comparison Between the SWEs Predicted with Snow Depth of P351 and SNOTEL Climate Data and the in-situ SWEs

测站	与 P351 站高差/m	距 P351 距离/km	$R^2$	RMSE/cm	Bias/cm
450	-126.19	30.86	0.91	8.4	-3.6
489	-415.75	3.81	0.86	7.6	5.7
490	-16.46	0.41	0.98	3.4	-1.5
845	38.40	13.39	0.93	16.4	-14.1
895	-769.32	27.24	0.57	13.9	11.7

在表 6 中，对比偏差与 SNOTEL 站和 P351 站的高差、距离并没有直接关系，可知在实验区域积雪并没有均匀的分布。但可以发现，高差越大， $R^2$  越小，相关性越差，这说明高差对积雪分布的影响是大于水平距离的。实际上，积雪的空间分布会受到地形因素、测站环境等因素的综合影响<sup>[31]</sup>，如 Jonas 等<sup>[26]</sup>在瑞士构建雪水当量转换模型时，发现积雪变化过程在不同空间位置受到气候以及季节变化的影响；McCreight 等<sup>[32]</sup>在雪水当量估计中探究了不同地表植被类型的影响。这些综合因素都可能造成测区积雪的不均匀分布。

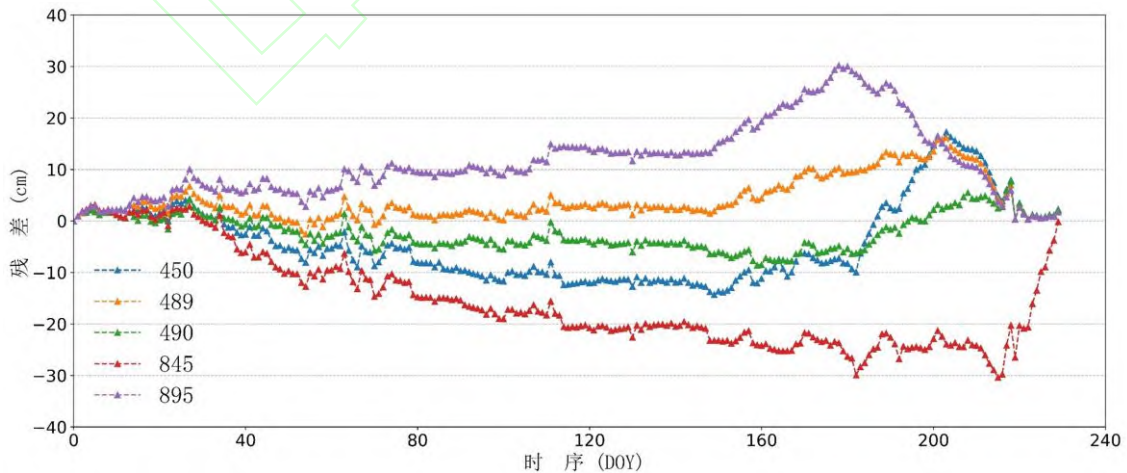


图 15 结合 P351 站雪深与 SNOTEL 气候变量的雪水当量估计值与原位观测值对比差值时间序列

Fig. 15 Time Series of the Differences Between the SWEs Predicted with Snow Depth of P351

and SNOTEL Climate Data and the in-situ SWEs

#### 4.1.4 空间差异与气候预测变量引入的综合影响

在利用气候预测变量进行雪水当量快速转换时，除了积雪空间差异存在影响，气候预测变量同样会引入一定的误差。为验证上述因素的综合影响，本文利用 P351 站的雪深观测值与各 SNOTEL 站位置的 ClimateNA 气候预测数据进行雪水当量估计并进行原位对比，实验结果如表 7 所示。

表 7 结合 P351 站雪深与 ClimateNA 站气候变量的雪水当量估计值与原位观测值对比结果

Tab.7 Comparison Between the SWEs Predicted with Snow Depth of P351 and

ClimateNA Climate Data and the in-situ SWEs

测站	与 P351 站 高差/m	距 P351 距离/km	$R^2$	RMSE/cm	Bias/cm
450	-126.19	30.86	0.91	8.6	-4.0
489	-415.75	3.81	0.89	5.8	4.2
490	-16.46	0.41	0.98	4.0	-2.2
845	38.40	13.39	0.91	17.9	-15.3
895	-769.32	27.24	0.59	13.6	11.5

对比表 7 与表 6 可以发现两次实验结果较为相近，490 站原位对比差异最小。图 16 给出了残差序列，其与图 15 分布情况基本一致，490 站对比残差分布也最为集中、稳定。说明空间差异与 ClimateNA 气候预测数据的综合影响下，在 § 3.2.2 中对 P351 站雪水当量进行估计与验证的这一过程具有合理性，空间差异与气候预测变量的引入并未造成实质性的影响。在 489、450 站也有着可接受的实验结果，这说明本文提出的方法可提供一定区域的雪水当量估计，这为利用 GPS 站加强现有积雪监测网络提供了新的参考。

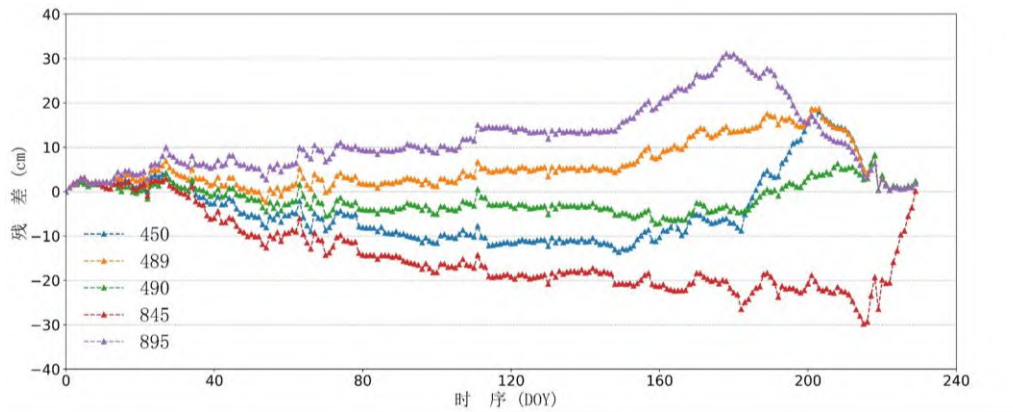


图 16 结合 P351 站雪深与 ClimateNA 气候变量的雪水当量估计值与原位观测值对比差值时间序列

Fig.16 Time Series of the Differences Between the SWEs Predicted with Snow Depth of P351 and ClimateNA Climate Data and the in-situ SWEs

#### 4.2 快速估计模型特点

基于 GPS-IR 技术的雪水当量转换模型结合积雪变化过程，描述了融雪不同阶段（积累期，消融期）变化过程与气候响应。对本文构建的转换模型与前文所述的三个模型在单一测站雪水当量估计中的主要特点进行了比较（见表 8）。可以发现，本文提出的模型具有时间延迟低、阶段描述性较好、监测范围大的优势。在时效性上，本文基于 GPS 单站单系统，为了保证结果可靠性，是对单日所有轨迹结果取平均，所以时间延迟为 1d，后续使用多系统（GPS、BDS、GLONASS、GALILEO）将获得更多的观测值，则有可能将时间分辨率提高，实现小时级的近实时雪水当量反演。

表 8 雪水当量转化模型的比较

Tab.8 Comparison of SWE Conversion models

模型	所需气象数据	时延	阶段描述	单站监测范围/ m <sup>2</sup>
Meløysund et al. <sup>[17]</sup>	风速、降水 气压、温度	1 水文年	—	≈10
McCreight et al. <sup>[32]</sup>	—	1 水文年	早期积累阶段、 主要积累阶段、 主要消融阶段、 晚期消融阶段	≈10
Hill et al. <sup>[15]</sup>	降水、温度	1 水文年	积累阶段、	≈10

			消融阶段
			积累阶段
GPS-IR 快速模型	降水、温度	1 d	≈2000
			消融阶段

结合 GPS 测站分布及 GPS-IR 技术特点，本文提出的模型在多站使用中还有以下特点：

#### 1) 改善现有积雪监测网络及产品

改善现有积雪监测网络。利用 GPS-IR 技术，使得广泛分布的 GPS 站可为缺乏积雪监测设备的地区提供监测能力。如 McCreight 等<sup>[32]</sup>证实在美国西部部分地区，GPS 站较大程度的补充了现有积雪监测网络。

细化现有积雪产品。降雪过程受气流的影响，传统气象站往往位于森林小片空地中，树木的遮挡使得气象站往往会有偏大的雪深，这使得相关的积雪产品对积雪分布的表达有所缺乏<sup>[32]</sup>。而 GPS 测站环境则由于缺乏植被保护，雪深相对气象站往往较浅<sup>[33]</sup>。因此，基于 GPS 站的雪水当量监测，对于区域表达不充分的相关积雪产品有良好的细化作用。

#### 2) 具有较高的适用性与推广价值

利用全球范围的积雪、气候数据集可使快速转换模型有更大的适用范围。在实现基于 GPS-IR 技术的雪水当量快速估计过程中，用于建模与约束参数的积雪、气候数据必不可少。如日本宇宙航空研究开发机构全球空间分辨率 10 km 的逐日雪深产品 (<http://www.jaxa.jp/>)、美国国家航空航天局发布的雪水当量标准产品和欧洲航天局发布的雪水当量产品 GlobSnow 在同类产品中影响力较大<sup>[34-35]</sup>；中国利用风云三号卫星 (FY-3) 获取的被动微波数据也发布了相应的全球雪深与雪水当量产品<sup>[36]</sup>。表 9 给出了上述积雪产品的相关细节。

表 9 积雪产品参数信息

Tab.9 Information About Snow Products

产品来源	覆盖范围	时间范围/年	空间分辨率	时间分辨率	数据种类
JAXA	全球	2012—	10km	逐日	雪深
NASA	全球	2000—	25km	逐日	雪水当量
ESA	北半球	1979—	25km	逐日	雪水当量
FY-3	全球	2011—	25km	逐日	雪水当量、雪深

气候数据可以通过现有气候数据集获取。例如 NASA 地球交换计划将全球实际观测数据与国际耦合模式比较计划第五阶段的气候模拟资料相结合, 提供了详尽的全球历史与未来温度和降水类型分布 (<https://www.nasa.gov/nex>); 欧洲中期天气预报中心可提供全球近实时及历史气候数据, 并能提供 0~13 个月的季节气候预测数据 (<https://www.ecmwf.int>), 详见表 10。

表 10 气候数据集参数信息

Tab.10 Information About Climate Datasets

产品来源	覆盖范围	时间范围/年	空间分辨率	时间分辨率	是否含有冬季
					预测数据
NASA	全球	1950—2100	25km	逐日	是
ECMWF	全球	1950—	0.1° ~ 0.4°	逐时	是

上述积雪与气候数据集可在全球范围内为缺乏积雪与气候监测设备地区转换模型构建与快速估计提供必要数据, 极大拓展了本文方法的适用范围。

另外, GPS 雪深监测方法的改进及硬件布设方式的改进使得转换模型可以广泛推广。如边少峰等<sup>[37]</sup>利用小波变换与滑动窗口相结合的方式改进了 GPS 雪深监测模型; 张双成等<sup>[38]</sup>通过对 GPS 测站周边地表网格化处理削弱了地形对 GPS 雪深监测的影响。其次, 将天线安装相对较高、空旷的位置等硬件安装的改进, 可提高雪深的监测范围。综合考虑监测网络中维护仪器的成本和数据遥测等成本, 将 GPS 网络与积雪遥感相结合具有明显的推广价值。

## 5 结语

本文基于 GPS-IR 雪深监测技术, 利用 PBO 网络中 P351 站 GPS 数据, 获取通过较高可靠性的雪深数据 ( $R^2=0.98$ , RMSE=11.1 cm, Bias=-3.7 cm); 通过美国爱达荷州 Ketchum 区域部分 SNOTEL 站 2011—2014 年水文年的积雪、历史气候数据构建出雪水当量转换模型; 利用 ClimateNA 项目气候预测数据, 对 P351 站积雪时序数据进行逐日估计, 比对结果显示快速估计值与实测数据有着高度一致性 ( $R^2=0.98$ ), 具有合理范围内的误差 (RMSE=4.2 cm, Bias=-2.5cm); 日估计结果的标准差为 3.0 cm, 有良好的可靠性, 可以满足大多数应用的需求, 为当地雪水管理提供了可行性方案。

本文提出的基于 GPS-IR 技术的雪水当量转换模型, 对于积雪监测仪器缺乏地区的提供了雪水当量估计的解决方案; 对现有积雪监测网络的增强、现有积雪产品的改善、监测时效性的提高等相关研究提供了参考。

**致谢:** 感谢 UNAVCO 提供的 GPS 观测数据以及 SNOTEL 网络提供的雪深、雪水当量参考资料。

#### 参考文献

- [1] Walsh J E. Snow Cover and Atmospheric Variability: Changes in the Snow Covering the Earth's Surface Affect both Daily Weather and Long-Term Climate[J]. American Scientist, 1984, 72(1): 50-57
- [2] Beniston M. Climatic Change in Mountain Regions: A Review of Possible Impacts [M]//Climate Variability and Change in High Elevation Regions: Past, Present & Future. Springer, 2003: 5-31
- [3] Elder K, Rosenthal W, Davis R E. Estimating the Spatial Distribution of Snow Water Equivalence in a Montane Watershed[J]. Hydrological Processes, 1998, 12(10 - 11): 1793-1808
- [4] McCreight J L, Small E. Modeling Bulk Density and Snow Water Equivalent Using Daily Snow Depth Observations[J]. The Cryosphere, 2014, 8(2): 521-536
- [5] Mizukami N, Perica S. Spatiotemporal Characteristics of Snowpack Density in the Mountainous Regions of the Western United States[J]. Journal of Hydrometeorology, 2008, 9(6): 1416-1426
- [6] Larson K M, Gutmann E D, Zavorotny V U, et al. Can We Measure Snow Depth with GPS Receivers? [J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(17): 1-5
- [7] Larson K M. GPS Interferometric Reflectometry: Applications to Surface Soil Moisture, Snow Depth, and Vegetation Water Content in the Western United States [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2016, 3(6): 775-787
- [8] Hefty J, Gerhatova L. Experience with Snow Depth Sensing Using GPS Multipath Gained at Some Permanent Stations in Central Europe[C]//The EGU General Assembly Conference Abstracts, F, 2013
- [9] Jin S, Najibi N. Sensing Snow Height and Surface Temperature Variations in Greenland from GPS Reflected Signals[J]. Advances in Space Research, 2014, 53(11): 1623-1633
- [10] Ethan D. Gutmann K M L, Mark Wet al. Snow Measurement by GPS Interferometric Reflectometry: An Evaluation at Niwot Ridge, Colorado[J]. 2012, 26: 2951 - 2961
- [11] Larson K M, Nievinski F G. GPS Snow Sensing: Results from the EarthScope Plate Boundary Observatory[J]. GPS Solutions, 2012, 17(1): 41-52
- [12] Gleason S, Gebre-Egziabher D. GNSS Applications and Methods [M]//London: Artech House, 2009
- [13] De Michele C, Avanzi F, Ghezzi A, et al. Investigating the Dynamics of Bulk Snow Density in Dry

- and Wet Conditions Using a One-Dimensional Model[J]. *The Cryosphere*, 2013, 7(2): 433-444
- [14] Meløysund V, Leira B, Høiseith K V, et al. Predicting Snow Density Using Meteorological Data [J]. *Meteorological Applications: A Journal of Forecasting, Practical Applications, Training Techniques And Modelling*, 2007, 14(4):413-423
- [15] Hill D F, Burakowski E A, Crumley R L, et al. Converting Snow Depth to Snow Water Equivalent Using Climatological Variables[J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(7):1767-1784
- [16] Jacobson M D. Estimating Snow Water Equivalent for a Slightly Tilted Snow-Covered Prairie Grass Field by GPS Interferometric Reflectometry[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2014, 2014(1):1-9.
- [17] McCreight J L, Small E E, Larson K M. Snow Depth, Density, and SWE Estimates Derived from GPS Reflection Data: Validation in the Western US[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(8): 6892-6909
- [18] Arogundade A B, Qualls R J. Is Climate Really Changing? Visible Signs of Climate Change in Idaho[C]//The 38th Annual Convention of The National Society of Black Engineers, Pittsburgh, PA, F, 2012
- [19] Herring T A, Melbourne T I, Murray M H, et al. Plate Boundary Observatory and related networks: GPS Data Analysis Methods and Geodetic Products[J]. *Reviews of Geophysics*, 2016, 54(4): 759-808
- [20] Wang T, Hamann A, Spittlehouse D L, et al. ClimateWNA—High-Resolution Spatial Climate Data for Western North America [J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2012, 51(1): 16-29
- [21] Wang T, Hamann A, Spittlehouse D, et al. Locally Downscaled and Spatially Customizable Climate Data for Historical and Future Periods for North America[J]. *Plos One*, 2016, 11(6): e0156720
- [22] Larson K M. Unanticipated Uses of the Global Positioning System[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2019, 47:19-40
- [23] Roesler C, Larson K M. Software Tools for GNSS Interferometric Reflectometry (GNSS-IR) [J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(3):1-10
- [24] Larson K M, Small E E, Gutmann E, et al. Using GPS Multipath to Measure Soil Moisture Fluctuations: Initial Results[J]. *GPS solutions*, 2008, 12(3):173-177
- [25] Lundberg A, Richardson-Näslund C, Andersson C. Snow Density Variations: Consequences for Ground-Penetrating Radar[J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(7): 1483-1495
- [26] Jonas T, Marty C, Magnusson J. Estimating the Snow Water Equivalent from Snow Depth Measurements in the Swiss Alps[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 378(1-2):161-167

- [27] Hill D F, Burakowski E A, Crumley R L, et al. Converting Snow Depth to Snow Water Equivalent Using Climatological Variables[J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(7):1767-1784
- [28] Gutmann E D, Larson K M, Williams M W, et al. Snow Measurement by GPS Interferometric Reflectometry: An Evaluation at Niwot Ridge, Colorado[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(19): 2951-2961
- [29] Nievinski F G, Larson K M. Inverse Modeling of GPS Multipath for Snow Depth Estimation—Part I: Formulation and Simulations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, 52(10):6555-6563
- [30] Sturm M, Taras B, Liston G E, et al. Estimating Snow Water Equivalent Using Snow Depth Data and Climate Classes [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(6):1380-1394
- [31] Dyer J L, Mote T L. Spatial Variability and Trends in Observed Snow Depth over North America [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(16):423-424
- [32] Mccreight J L, Small E E, Larson K M. Snow Depth, Density, and SWE Estimates Derived from GPS Reflection Data: Validation in the Western U. S[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(8): 6892-6909
- [33] Clow D W, Nanus L, Verdin K L, et al. Evaluation of SNODAS Snow Depth and Snow Water Equivalent Estimates for the Colorado Rocky Mountains, USA[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(17): 2583-2591
- [34] Huang Xiaodong, Li Xubing, Liu Changyu, et al. Remote Sensing Inversion of Snow Cover Extent and Snow Depth/Snow Water Equivalent on the Qinghai-Tibet Plateau: Advance and Challenge[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(5):1138-1149 (黄晓东, 李旭冰, 刘畅宇, 等 青藏高原积雪范围和雪深/雪水当量遥感反演研究进展及挑战[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(5):1138-1149)
- [35] Takala M, Luoju K, Pulliainen J, et al. Estimating Northern Hemisphere Snow Water Equivalent for Climate Research Through Assimilation of Space-Borne Radiometer Data and Ground-Based Measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12):3517-3529
- [36] Jiang L M, Wang P, Zhang L X, et al. Improvement of Snow Depth Retrieval for FY3B-MWRI in China [J]. *Science China Earth Science*, 2014, 57(6):1278-1292
- [37] Bian Shaofeng, Zhou Wei, Liu Lilong, et al. GNSS-IR model of snow depth estimation combining wavelet transform with sliding window[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(9): 1179-1188 (边少锋, 周威, 刘立龙, 等 小波变换与滑动窗口相结合的 GNSS-IR 雪深估测模型 [J]. *测绘学报*, 2020, 49(9):1179-1188)
- [38] Zhang S, Wang X, Zhang Q. Avoiding Errors Attributable to Topography in GPS-IR Snow Depth

# Rapid Estimation of Snow Water Equivalent Using GPS Interferometric Reflectometry (GPS-IR) Observations

WANG Jiatong<sup>1,2</sup> HU Yufeng<sup>1,2,3</sup> LI Zhenhong<sup>1,2,3</sup> ZHANG Chenglong<sup>1,2</sup> ZHANG Miaomiao<sup>1,2</sup>

YANG Jing<sup>1,2</sup> JIANG Wandong<sup>1,2</sup>

- 1 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China
- 2 Big Data Center for Geosciences and Satellites, Chang'an University, Xi'an 710054, China
- 3 Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China

**Abstract:** **Objectives:** Snow Water Equivalent (SWE) plays a key role in climate change prediction, water resource management and agricultural production planning. GPS interferometric reflectometry (GPS-IR) has been proven to be a powerful tool to monitor snow depth. **Methods:** An efficient framework is presented to rapidly estimate SWE from GPS-IR derived snow depth. Firstly, the daily snow depth products are obtained using GPS observations with the GPS-IR technique. Secondly, a SWE conversion model is constructed using snow depth, SWE and climate observations from Snow TELEmetry (SNOTEL) stations in the study region. Finally, using the climate forecast data provided by the Historical and projected climate data for North America (ClimateNA) project as parameter constraints, the daily GPS snow depth product is converted into SWEs. **Results:** The application of the proposed framework to GPS data from the plate boundary observatory (PBO), USA shows that: (1) The GPS-IR derived snow depth product is reliable ( $R^2 = 0.98$ , RMSE = 11.1 cm, Bias = -3.7cm); (2) The daily GPS snow depth can be converted into SWE with high reliability ( $R^2 = 0.98$ , RMSE = 4.2 cm, Bias = -2.5cm) and stability (standard deviation of 3.0 cm); (3) The rapid conversion model has high spatiotemporal stability with most of the residuals lying within the range of [-5 cm, 5 cm]; (4) The additional uncertainties introduced by the climate forecast data and the spatial variations of snow depths have limited impacts on the estimation of SWE. **Conclusions:** It is believed that the proposed framework can not only provide guidance to rapidly estimate SWE in regions lacking snow monitoring equipment, but also provide a reference to enhance existing snow observation network and improve accumulated snow products.

**Key words:** GPS-IR; snow depth; snow water equivalent; rapid estimation

**First author:** WANG Jiatong, postgraduate,, specializes in GNSS-IR snow monitoring.

E - mail:jiatong\_wang417@163.com

**Corresponding authors:**HUYufeng, PhD, lecturer. E - mail: yfhu@chd.edu.cn

LI Zhenhong, PhD, professor.E - mail: zhenhong.li@chd.edu.cn

**Foundation support:**The National Natural Science Foundation of China (41941019,41904020); the Natural Science Research Project of Shan'xi Province (2020JQ-350); the Science and Technology Innovation Team of Shan'xi Province (2021TD-51); the Fundamental Research Funds for the Central Universities, CHD (300102260301, 300102261108, 300102261404); the ESA-MOST DRAGON-5 project (59339).

