

引用格式: 鄧宇凡, 王宁练, 吴玉伟, 陈安安. 山地冰川表面温度反演算法对比——以祁连山七一冰川为例[J]. 山地学报, 2021, 39(1): 129-142

QIE Yufan, WANG Ninglian, WU Yuwei, Chen Anan. Comparison of algorithms for retrieving mountain glacier surface temperature from remote sensing data: a case study on the Qiyi Glacier in the Qilian Mountains, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(1): 129-142

# 山地冰川表面温度反演算法对比 ——以祁连山七一冰川为例

鄧宇凡<sup>1,2</sup>, 王宁练<sup>1,2,3\*</sup>, 吴玉伟<sup>1,2</sup>, 陈安安<sup>1,2</sup>

(1. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127; 2. 西北大学 城市与环境学院, 西安 710127;

3. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

**摘 要:** 冰川表面温度决定冰川表面热力状况分布和消融状态, 其对建立冰川能量—物质平衡模型和研究气候变化背景下的冰川响应具有重要意义。Landsat 系列卫星提供了海量免费高空间分辨率遥感数据, 广泛应用于表面温度的时空变化研究。本文使用 2013 年 5 月至 2014 年 9 月的 10 景 Landsat 8 TIRS 热红外数据, 对比三种单通道温度反演算法(覃志豪单窗算法、Juan C. Jiménez-Muñoz 普适性单通道算法和 Jordi Cristóbal 普适性单通道改进算法)和两种劈窗温度反演算法(Juan C. Jiménez-Muñoz 劈窗算法和 Offer Rozenstein 劈窗算法)在祁连山七一冰川表面的准确度和适用性, 结果表明: (1) 劈窗算法反演精度高于单通道算法, 其中 Offer Rozenstein 劈窗算法误差最小, 均方根误差为 1.75 K、平均绝对误差为 1.49 K, 而 Jordi Cristóbal 普适性单通道改进算法误差较大, 均方根误差和平均绝对误差分别为 3.35 K 和 2.72 K; (2) 夏季消融期各算法均有较大偏差, 冬季是各算法反演误差最小的季节; (3) 覃志豪单窗算法对水汽含量敏感性最低, Offer Rozenstein 劈窗算法对水汽含量和发射率的敏感性较高; Jordi Cristóbal 普适性单通道改进算法在低大气含水量的高海拔冰川地区存在一定局限性。研究结果为不同表面温度反演算法在高海拔山地冰川区域的对比和适用性研究提供了科学依据。

**关键词:** 冰川表面温度; Landsat 8; 七一冰川

**中图分类号:** P343.6

**文献标志码:** A

地表温度是区域和全球尺度陆地表层系统的关键参数, 是反映陆表能量收支的重要指标<sup>[1-4]</sup>。地表温度也是地—气之间物质和能量交换的重要驱动因素, 对近地表的大气运动、水相态变化、植被生长和人类生存环境都有重要影响<sup>[5-8]</sup>。冰川表面温度是冰川的重要物理指标之一, 能够反映冰川发育的水热和动力状况, 因此被用作冰川类型(大陆型冰川和海洋型冰川)划分的重要依据<sup>[9]</sup>。冰川表面温

度决定了冰川周期性消融的起始、持续时间及消融范围, 可用于表征冰川消融强度; 冰川表面温度对气候变化响应非常迅速, 成为气候变化灵敏的指示器。

冰川表面温度数据主要通过气象站实测和热红外遥感反演获取。气象站实测资料受冰川本身和外在地形、气候等环境因素的影响, 数据的时空完整性都存在较大的缺陷<sup>[10-11]</sup>, 而热红外遥感是目前获取

收稿日期(Received date): 2020-02-06; 改回日期(Accepted date): 2020-12-18

基金项目(Foundation item)中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA19070302、XDA20060201); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK020102)。[The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences(XDA19070302、XDA20060201); The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program(2019QZKK020102)]

作者简介(Biography): 鄧宇凡(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 冰川温度反演。[QIE Yufan(1995-), male, born in Shenmu, Shaanxi province, M. Sc. candidate, research on glacier temperature retrieve] E-mail: yufanqie@stumail.nwu.edu.cn

\* 通讯作者(Corresponding author): 王宁练(1966-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 冰冻圈与全球变化。[WANG Ninglian(1966-), male, Ph. D., professor, research on cryosphere and global change] E-mail: nlwang@nwu.edu.cn

冰川区域大范围、长时间序列表面温度的重要手段。经过几十年的发展,已出现多种热红外表面温度反演算法,主要分为单通道算法和多通道算法<sup>[12-14]</sup>。最新的 Landsat 8 卫星提供了高空间分辨率的双通道热红外数据<sup>[15]</sup>,是地表温度反演的重要遥感数据来源。目前已有众多研究针对 Landsat 8 的热红外传感器 (Thermal Infrared Sensor, TIRS),对表面温度的单通道反演算法<sup>[16-19]</sup>和劈窗算法<sup>[16,20]</sup>进行改进。

众多学者在不同下垫面对 Landsat 8 TIRS 的温度反演算法进行了对比分析。例如,有学者基于 SURFRAD 站点实测数据对比发现 Jiménez-Muñoz 劈窗算法精度高于 Jiménez-Muñoz 普适性单通道算法<sup>[21]</sup>;基于中国太湖实测水体表面数据对比结果表明 Offer Rozenstein 劈窗算法和 Juan C. Jiménez-Muñoz 劈窗算法的精度高于覃志豪单窗算法和 Jiménez-Muñoz 普适性单通道算法<sup>[22]</sup>;以草地为下垫面中 Jiménez-Muñoz 劈窗算法精度高于 Jiménez-Muñoz 普适性单通道算法<sup>[23]</sup>;而在城市区域发现 Jiménez-Muñoz 劈窗算法精度高于覃志豪单窗算法, Jiménez-Muñoz 普适性单通道算法精度最差<sup>[24]</sup>;同时研究表明海拔高度、坡度和坡向对山地区域表面温度反演影响显著<sup>[25]</sup>。需要注意的是,上述文献的温度反演算法对比基于不同校正时期下的 Landsat TIRS 数据。由于 Landsat 8 TIRS 传感器受到视域外杂散光的影响,定标精度未达到设计目标,Landsat 8 团队在 2014 年 1 月尝试对其进行校正,但众多学者<sup>[26-29]</sup>仍发现 TIRS 11 波段的误差较高,使用劈窗算法反演地表温度存在较大不确定性。在 2017 年 4 月,Landsat 8 团队重新对 TIRS 传感器进行了杂散光校正,校正后在水体(300 K)试验发现 TIRS 10 波段的误差从 2.1 K 降到 0.3 K,TIRS 11 波段的误差从 4.4 K 降低到 0.19 K,劈窗算法的适用性还在评估中。

目前以冰川为下垫面的 Landsat 8 表面温度反演算法研究相对较少,有学者基于 Landsat 7 ETM+ 数据在七一冰川表面温度反演过程中考虑冰雪发射率的出射角度差异,得到较好的结果<sup>[3]</sup>。基于前人研究,本文针对 Landsat 8 TIRS 数据,将目前的五种典型表面温度反演算法:覃志豪单窗算法 MW (Mono Windows Algorithm)、Juan C. Jiménez-Muñoz 普适性单通道算法 SC (Single Channel Method)、

Jordi Cristóbal 普适性单通道改进算法 SC\_T (Single Channel Temperature Method)、Juan C. Jiménez-Muñoz 劈窗算法 SW\_JM (Split Window Jiménez-Muñoz Algorithm)和 Offer Rozenstein 劈窗算法 SW\_R (Split Window Rozenstein Algorithm)应用于青藏高原祁连山七一冰川表面温度反演,通过七一冰川气象站实测表面温度对各算法反演结果的精度分别进行验证,同时对五种表面温度反演算法的参数敏感性进行分析,确定在冰川区域各参数对表面温度反演算法带来的影响,为获取更高精度的高海拔山地冰川表面温度提供了科学依据,对研究气候变化背景下的冰川响应具有重要意义。

## 1 研究区概况

七一冰川(39°14'13"N,97°45'20"E)位于青藏高原祁连山中段,属于亚大陆型冰川,是中国开展现代冰川综合考察与研究的首条冰川<sup>[30]</sup>。七一冰川长约 3.66 km,面积 2.698 km<sup>2</sup>,冰川海拔为 4310 ~ 5145 m,最大坡度约 51°。冰川主要受到西风环流以及夏季亚洲季风的影响,消融与降水集中在夏季。随着全球升温,从 1956—2013 年,七一冰川面积减少了 10.3%、末端退缩了 0.87 km<sup>[31]</sup>。近期物质平衡观测表明七一冰川亏损强烈<sup>[32]</sup>,冰川平衡线高度在 1958—2008 年呈上升趋势,近 50 年来上升了约 230 m<sup>[33]</sup>,且该冰川运动速度逐年减弱<sup>[34]</sup>。在本文研究时段内,在七一冰川海拔 4410 m 和 4770 m 处分别架设有自动气象站(Automatic Weather Station, AWS),可获得冰川表面温度实测值,用于遥感反演表面温度的验证(图 1)。

## 2 数据源与主要参数

### 2.1 热红外遥感数据

本文选取 2013 年 7 月 19 日至 2014 年 9 月 8 日共 10 景的晴空 Landsat 8 TIRS 热红外遥感数据(<http://glovis.usgs.gov/>)(表 1),根据成像时间将其划分到四个季节,其中春季(3~5 月)3 景、夏季(6~8 月)2 景、秋季(9~11 月)3 景,冬季(12~次年 2 月)2 景。Landsat 8 重复观察周期为 16 d,其携带的 TIRS 传感器在 10 ~ 12 μm 区间内有两个热红外波段,分别为 TIRS 10 和 TIRS 11<sup>[15]</sup>。

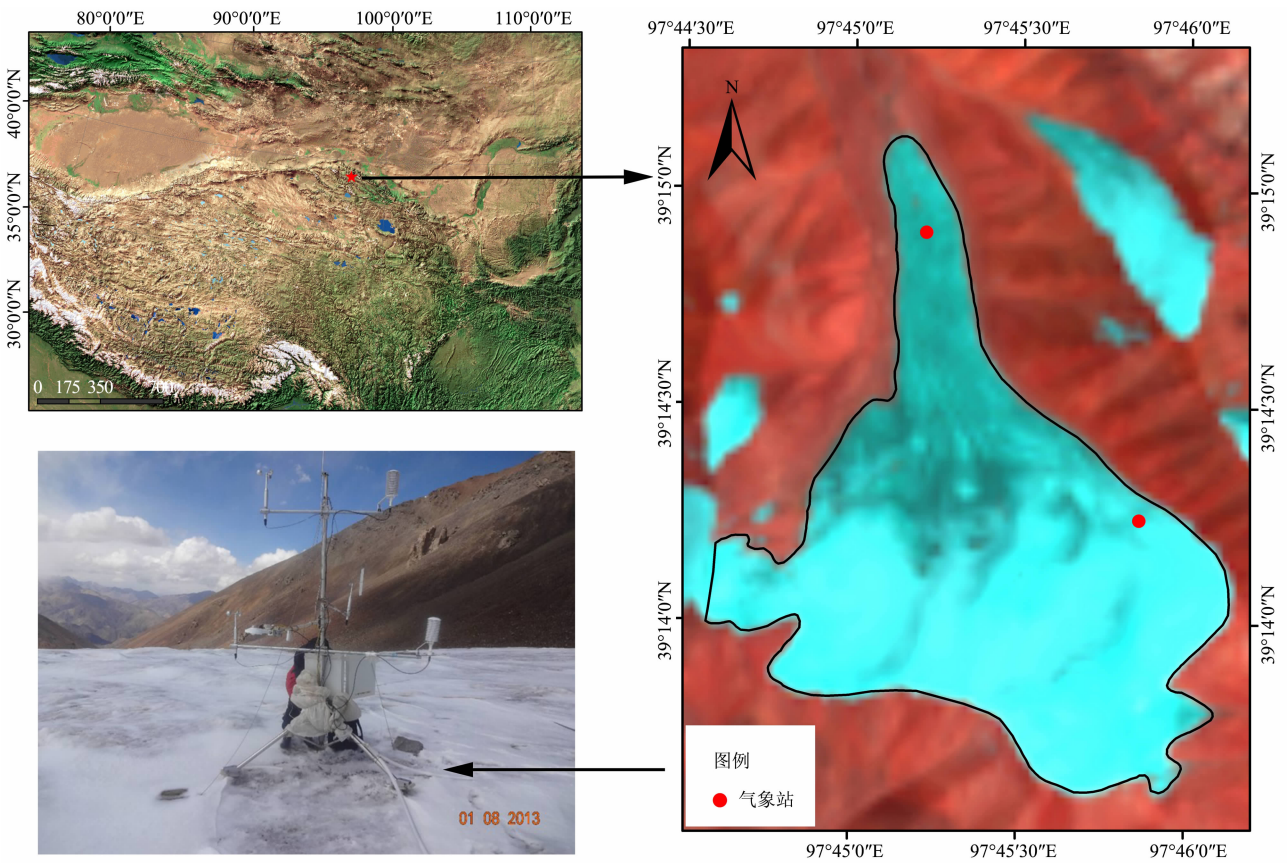


图 1 七一冰川及气象站区位图

Fig.1 Location of Qiyi Glacier China and red dots represent AWS sites

表 1 Landsat 8 和 MODIS 过境时间及两个气象站验证点水汽含量

Tab. 1 Passing time lists of Landsat 8 and MODIS and the water vapor content for two AWS area

过境日期	儒略日	季节	Landsat 8 过境时间	气象站实测温度/K		MODIS 过境时间	水汽含量/(g·cm <sup>-2</sup> )	
				海拔 4410 m	海拔 4770 m		海拔 4410 m	海拔 4770 m
2013-07-19	2013_200	夏季	12:10:02	273.25	272.92	13:10:00	0.75	0.57
2013-08-04	2013_216	夏季	12:10:05	273.68	273.33	13:10:00	0.87	0.80
2013-10-07	2013_280	秋季	12:09:54	270.60	267.45	13:10:00	0.36	0.26
2013-10-23	2013_296	秋季	12:09:52	264.35	261.97	13:10:00	0.13	0.11
2013-12-10	2013_344	冬季	12:09:40	256.06	245.15	13:10:00	0.22	0.19
2014-01-11	2014_011	冬季	12:09:19	251.20	245.52	13:10:00	0.27	0.24
2014-03-16	2014_075	春季	12:08:34	268.44	268.50	13:10:00	0.19	0.23
2014-05-03	2014_125	春季	12:07:49	271.29	268.79	13:10:00	0.32	0.28
2014-05-19	2014_141	春季	12:07:35	272.52	269.42	13:10:00	0.18	0.11
2014-09-08	2014_248	秋季	12:08:13	273.66	273.44	13:10:00	0.61	0.53

2.2 冰川表面实测数据

冰川表面实测温度由分别架设在七一冰川表面的两个自动气象站(海拔 4410 m 和 4770 m)的 SI -

111 红外辐射计观测得到(图 1 中红点所示)。SI - 111 每 30 s 记录一次温度值,但输出的是 10 min 的平均值。受此限制,本研究将 Landsat 8 反演的瞬时

温度值与其过境时刻所在的 10 min 平均温度值进行比较。SI-111 红外辐射计观测的温度需要根据地表发射率和大气下行辐射进行校正,公式如下:

$$B(T) = [B(T_s) - (1 - \varepsilon)L_{sky}] / \varepsilon \quad (1)$$

式中, $B$  是普朗克公式在 SI-111 辐射计的光谱响应函数( $W \cdot (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)^{-1}$ ); $T_s$  是 SI-111 观测的温度(K); $\varepsilon$  为冰雪发射率; $L_{sky}$  是大气下行辐射( $W \cdot (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)^{-1}$ ),由自动气象站搭载的 CNR1 四分量辐射仪提供。

### 2.3 MODIS 水汽产品

本文使用 MODIS 近红外大气水汽产品 MOD05\_L2<sup>[35]</sup> 估算水汽含量,MOD05\_02 是 MODIS 2 级大气产品,空间分辨率为 1 km,过境时间为当地时间 13:10 左右(表 1),本文中假设 Landsat 8 与 MODIS 过境期间研究区水汽含量不变。已有研究表明 MOD05 的水汽产品可以用于 Landsat 热红外数据的表面温度反演<sup>[36]</sup>。由于 MOD05\_L2 大气水汽产品分辨率较低,根据高程和水汽含量之间的线性关系,使用 30 m 分辨率的 GDEM 高程数据,将 1 km 的大气水汽产品重采样到 30 m 使用,得到的两个气象站验证点的大气水汽含量如表 1 所示。

### 2.4 冰雪发射率

发射率是表面温度反演的重要输入参数之一。研究表明,0.01 的发射率误差会导致 1 °C ~ 2 °C 的表面温度反演误差<sup>[37]</sup>。目前,分类赋值法<sup>[38]</sup> 和 NDVI 阈值法<sup>[39]</sup> 被广泛应用于计算地表发射率。由于冰雪在热红外波段吸收率和发射率均较高,需要使用更合适的方法计算冰川表面冰雪发射率。Wu<sup>[3]</sup> 等在反演七一冰川表面温度时使用 Hori<sup>[40]</sup> 等

提出的考虑出射角度的冰雪发射率得到很好效果,因此本文也使用基于出射角度的冰雪发射率用于七一冰川表面温度反演。

Hori<sup>[40]</sup> 等分析 8 ~ 14 μm 大气窗口中的冰雪方向性发射率变化,发现冰雪发射率与雪粒大小和出射角有关,假设冰雪发射率可以由镜面和黑体表面的发射率与权重参数的线性组合表示:

$$\varepsilon_{snow}(\lambda, \theta) = \varepsilon_{bb}(1 - f_{sp}) + \varepsilon_{sp\_app}(\lambda, \theta)f_{sp} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{sp\_app}(\lambda, \theta) = \varepsilon_{sp}(\lambda, \theta)(1 - f_{sp}) + \varepsilon_{sp}(\lambda, \theta)(f_{sp}) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{sp}(\lambda, \theta) = 1 - \rho_{sp}(\lambda, \theta) \quad (4)$$

式中, $\lambda$  是波长(μm); $\theta$  是从法线方向的出射角(°); $\varepsilon_{snow}(\lambda, \theta)$  是雪的角度相关发射率; $\varepsilon_{bb}(1 - f_{sp})$  是各向同性黑体的发射率; $\varepsilon_{sp\_app}(\lambda, \theta)$  是镜面反射率的表观发射率; $\varepsilon_{sp}(\lambda, \theta)$  是用菲涅耳反射率  $\rho_{sp}(\lambda, \theta)$  模拟的理想光滑冰面的发射率; $f_{sp}$  为加权参数,指示镜面内镜面的有效面积分数。其中,式(4)由基尔霍夫辐射定律所得<sup>[40-41]</sup>。

本文综合使用三种波段比值法(近红外与短波红外的比值、红光波段与短波红外的比值和归一化雪被指数),并利用非监督分类及实地观测对研究区冰雪类型分类。最终,将七一冰川的冰雪分为五类:细粒雪、中粒雪、粗粒雪、雪壳和裸冰。

### 2.5 大气透过率

大气透过率对地表辐射在大气中的传导有显著影响。Yu<sup>[20]</sup> 等运用大气模拟程序,计算出 Landsat 8 TIRS 不同大气水汽含量与大气透过率之间的关系(表 2)。本文利用表 2 中的公式,通过 MODIS 大气水汽含量估算大气透过率。

表 2 不同水汽范围内大气透过率与水汽含量关系

Tab. 2 Relationships between atmospheric transmittance and water vapor content

大气模式	水汽含量范围/(g · cm <sup>-2</sup> )	大气透过率估算公式	r <sup>2</sup>	RMSE
美国 1976 年 标准大气	0.2 ~ 3.0	$\tau_{10} = -0.01646w^2 - 0.04546w + 0.9744$	0.9985	0.00354
		$\tau_{11} = -0.01403w^2 - 0.09748w + 0.9731$	0.9996	0.00257
	3.0 ~ 6.0	$\tau_{10} = 0.006416w^2 - 0.1914w + 1.2120$	0.9999	0.00145
		$\tau_{11} = 0.01647w^2 - 0.2854w + 1.2680$	0.9998	0.00206
中纬度夏季	0.2 ~ 3.0	$\tau_{10} = -0.0164w^2 - 0.04203w + 0.9715$	0.9993	0.00201
		$\tau_{11} = -0.01218w^2 - 0.07735w + 0.9603$	0.9996	0.00216
	3.0 ~ 6.0	$\tau_{10} = -0.00168w^2 - 0.1329w + 1.127$	0.9999	0.00072
		$\tau_{11} = -0.09186w^2 - 0.2137w + 1.181$	0.9997	0.00253

2.6 大气平均作用温度

大气平均作用温度主要取决于大气状态和大气剖面气温分布。Qin<sup>[13]</sup>等分析了大气水分、气温与海拔之间的关系,得到不同大气模式下大气平均作用温度的计算公式(表3),大气平均作用温度 $T_a(K)$ 可以通过与地面气温 $T_0(K)$ 的线性函数近似推算得到。本文使用自动气象站观测到的2 m空气温度作为地面气温 $T_0$ 用于大气平均作用温度 $T_a$ 的计算。

表3 大气平均作用温度估算方程  
Tab.3 Equation for estimating the average operation temperature of atmosphere

大气模式	大气平均作用温度估算方程
热带大气	$T_a = 17.9769 + 0.91715T_0$
中纬度夏季	$T_a = 16.0110 + 0.92621T_0$
中纬度冬季	$T_a = 19.2704 + 0.91118T_0$
1976年美国标准大气	$T_a = 25.9396 + 0.88045T_0$

3 典型冰川表面温度反演算法

本文选择5种典型表面温度反演算法获取七一冰川表面温度,分别为MW、SC、SC\_T、SW\_JM和

SW\_R算法。单通道算法MW、SC和SC\_T均使用TIRS 10波段亮温数据;劈窗算法SW\_JM和SW\_R使用TIRS 10波段和11波段亮温数据。不同温度反演算法输入参数如表4所示。

3.1 覃志豪单窗算法

覃志豪单窗算法(MW)是Qin<sup>[13]</sup>等依据辐射传输方程推导的表面温度反演算法。基于Landsat 8 TIRS,Wang<sup>[17]</sup>等对MW算法进行适用性推导,公式如下:

$$LST = [a_{10}(1 - C_{10} - D_{10}) + (b_{10}(1 - C_{10} - D_{10}) + C_{10} + D_{10})T_{10} - D_{10}T_a]/C_{10}$$
 (5)

$$C_{10} = \varepsilon_{10}\tau_{10}$$
 (6)

$$D_{10} = (1 - \tau_{10})[1 + (1 - \varepsilon_{10})\tau_{10}]$$
 (7)

式中, $\varepsilon_{10}$ 为TIRS传感器第10波段的地表发射率; $\tau_{10}$ 为TIRS传感器第10波段的大气透过率; $T_{10}$ 为TIRS传感器第10波段的亮温(K); $T_a$ 为大气平均作用温度(K)。 $a_{10}$ 和 $b_{10}$ 是基于Landsat 8 TIRS的热红外辐射亮度与温度的系数,本文参考已有研究的针对青藏高原地区不同温度范围TIRS的10、11波段系数 $a$ 和 $b$ <sup>[42]</sup>(表5)。

表4 五种温度反演算法输入参数  
Tab.4 The input parameters of five LST retrieval algorithms

温度反演算法	TIRS 10 亮温	TIRS 11 亮温	地表发射率	大气透过率	大气水汽含量	近地表气温
MW	√		√	√		√
SC	√		√		√	
SC_T	√		√		√	√
SW_JM	√	√	√		√	
SW_R	√	√	√	√		

表5 不同温度范围内 $a$ 和 $b$ 取值  
Tab.5 Coefficient  $a$  and  $b$  for different temperature ranges

温度范围/℃	$a_{10}$	$b_{10}$	$R_{10}^2$	$a_{11}$	$b_{11}$	$R_{11}^2$
-20 ~ 40	-56.9600	0.4130	0.9987	-61.5250	0.4508	0.9989
-20 ~ 30	-55.2370	0.4067	0.9989	-59.7400	0.4442	0.9989
-20 ~ 20	-53.3150	0.4002	0.9990	-57.9510	0.4375	0.9990
-20 ~ 10	-51.7950	0.3937	0.9991	-56.1590	0.4308	0.9991
-10 ~ 40	-58.8540	0.4194	0.9989	-63.4930	0.4575	0.9990
-10 ~ 30	-57.1020	0.4131	0.9990	-61.6820	0.4510	0.9991
-10 ~ 20	-55.3510	0.4068	0.9991	-59.8660	0.4443	0.9992
0 ~ 40	-60.7480	0.4258	0.9991	-65.4540	0.4640	0.9991
0 ~ 30	-58.9680	0.4195	0.9992	-63.6180	0.4576	0.9992

### 3.2 Juan C.Jiménez-Muñoz 普适性单通道算法

Juan C. Jiménez-Muñoz 普适性单通道算法 (SC) 是由 Jiménez-Muñoz 和 Sobrino<sup>[14]</sup> 提出, Jiménez-Muñoz 等<sup>[16]</sup> 在其基础上针对 Landsat 8 修改参数得到的,其公式如下:

$$LST = r[\varepsilon^{-1}(\psi_1 L + \psi_2) + \psi_3] + \delta \quad (8)$$

$$r \approx \frac{T^2}{b_r L} \quad (9)$$

$$\delta \approx T_{10} - T_{10}^2/b_r \quad (10)$$

式中,  $\varepsilon$  为地表发射率;参数  $b_r$  随波段变化, TIRS 10 为 1324 K, TIRS 11 为 1199 K;  $L$  为大气顶部光谱辐射值 ( $W \cdot (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)^{-1}$ );  $T_{10}$  为 TIRS 传感器第 10 波段的亮温 (K);  $\psi_1$ 、 $\psi_2$ 、 $\psi_3$  为大气水汽含量  $w$  ( $g \cdot cm^{-2}$ ) 的函数,可由下式获得:

$$\psi_1 = C_{11}w^2 + C_{12}w + C_{13} \quad (11)$$

$$\psi_2 = C_{21}w^2 + C_{22}w + C_{23} \quad (12)$$

$$\psi_3 = C_{31}w^2 + C_{32}w + C_{33} \quad (13)$$

$$\psi_1 = 1/\tau \quad (14)$$

$$\psi_2 = -L^\downarrow - L^\uparrow/\tau \quad (15)$$

$$\psi_3 = L^\downarrow \quad (16)$$

式中,  $\tau$  为大气透过率;  $L^\uparrow$  和  $L^\downarrow$  为大气上行和下行辐射强度 ( $W \cdot (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)^{-1}$ );  $C_{ij}$  ( $i=1, 2, 3; j=1, 2, 3$ ) 是与大气水汽含量  $w$  相关的系数,可表示如下:

$$C = \begin{pmatrix} 0.04019 & 0.02916 & 1.01523 \\ -0.38333 & -1.50294 & 0.20324 \\ 0.00918 & 1.36072 & -0.27514 \end{pmatrix} \quad (17)$$

### 3.3 Jordi Cristóbal 普适性单通道改进算法

Jordi Cristóbal 普适性单通道改进算法 (SC\_T)<sup>[18]</sup> 与 SC 算法<sup>[16]</sup> 基本一致,不同处是在于计算系数  $\psi_1$ 、 $\psi_2$ 、 $\psi_3$  时, SC\_T 引入参数近地表空气温度  $T_0$  (K), 其中  $\psi_1$ 、 $\psi_2$ 、 $\psi_3$  由下式获得:

$$\psi_n = iw^2 + hT_0^2 + gw + fT_0 + eT_0^2w + dT_0W + cT_0W^2 + bT_0^2w^2 + a \quad (18)$$

式中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $f$ 、 $g$ 、 $h$ 、 $i$  是近地表空气温度  $T_0$  (K) 与大气水汽含量  $w$  ( $g \cdot cm^{-2}$ ) 的系数<sup>[18]</sup>。

### 3.4 Juan C.Jiménez-Muñoz 劈窗算法

Juan C. Jiménez-Muñoz<sup>[16]</sup> 等根据 Landsat 8 数据特点进行大气辐射传输模拟,提出基于 Landsat 8 的表面温度劈窗算法 (SW\_JM),公式如下:

$$LST = T_{10} + c_1(T_{10} - T_{11}) + c_2(T_{10} - T_{11})^2 + c_0 + (c_3 + c_4w)(1 - \varepsilon) + (c_5 + c_6w)\Delta\varepsilon \quad (19)$$

式中,  $T_{10}$  和  $T_{11}$  为 TIRS 传感器第 10、11 波段的亮温 (K);  $\varepsilon$  为 TIRS 10 波段和 11 波段地表发射率的平均值,即  $\varepsilon = 0.5(\varepsilon_{10} + \varepsilon_{11})$ ;  $\Delta\varepsilon$  为 TIRS 10 波段和 11 波段地表发射率的差值,即  $\Delta\varepsilon = (\varepsilon_{10} - \varepsilon_{11})$ ;  $w$  为大气水汽含量 ( $g \cdot cm^{-2}$ );  $c_0 \sim c_6$  是经模拟得到的 Landsat 8 劈窗算法系数,分别为 -0.268、1.378、0.183、54.300、-2.238、-129.200 和 16.400。

### 3.5 Offer Rozenstein 劈窗算法

Rozenstein<sup>[19]</sup> 等提出适用于 Landsat 8 TIRS 的表面温度劈窗算法 (SW\_R),公式如下:

$$LST = A_0 + A_1T_{10} - A_2T_{11} \quad (20)$$

式中,  $T_{10}$ 、 $T_{11}$  为 TIRS 传感器第 10、11 波段的亮温 (K)。  $A_0$ 、 $A_1$  和  $A_2$  是 TIRS 10、11 波段的系数,公式如下:

$$A_0 = E_1a_{10} - E_2a_{11} \quad (21)$$

$$A_1 = 1 + A + E_1b_{10} \quad (22)$$

$$A_2 = 1 + E_2b_{11} \quad (23)$$

$$A = D_{10}/E_0 \quad (24)$$

$$E_0 = D_{11}C_{10} - D_{10}C_{11} \quad (25)$$

$$E_1 = D_{11}(1 - C_{10} - D_{10})/E_0 \quad (26)$$

$$E_2 = D_{10}(1 - C_{11} - D_{11})/E_0 \quad (27)$$

式中,系数  $a_i$  和  $b_i$  参考表 5;  $C_i$  和  $D_i$  为大气透过率和地表发射率所确定的参数,由下式计算:

$$C_i = \varepsilon_i\tau_{i(\theta)} \quad (28)$$

$$D_i = [1 - \tau_{i(\theta)}][1 + (1 - \varepsilon_i)\tau_{i(\theta)}] \quad (29)$$

式中,  $\varepsilon_i$  为 TIRS 10、11 波段的地表发射率;  $\tau_{i(\theta)}$  为太阳天顶角为  $\theta$  时的大气透过率。

## 4 冰川表面温度反演结果对比分析

本文使用七一冰川两个气象站实测的表面温度与上述五种算法反演的冰川表面温度结果进行对比,结果表明: MW、SC、SC\_T、SW\_JM 和 SW\_R 反演的表面温度与 4410 m 自动气象站实测温度的平均绝对误差分别为 2.12 K、2.21 K、2.61 K、1.37 K 和 1.52 K (表 6), 与 4770 m 自动气象站实测温度的平均绝对误差分别为 2.44 K、2.59 K、2.83 K、2.23 K 和 1.46 K (表 7), 五种反演算法在 4410 m 气象站的绝对误差整体小于 4770 m 气象站。劈窗反演算法

(SW\_JM 和 SW\_R) 的精度高于单通道反演算法 (MW、SC 和 SC\_T) (图 2), 与众多学者在其他下垫面的结论基本一致<sup>[21-24]</sup>。MW 和 SC 算法的 RMSE 在 2.97 K 左右, 两种算法精度均低于 SW\_JM 和 SW\_R 劈窗算法; 劈窗算法中 SW\_R 反演精度最高, RMSE 为 1.75 K, MAE 为 1.49 K; 而 SC\_T 算法的反演精度最差, RMSE 为 3.35 K, MAE 为 2.72 K (图

2)。当冰川表面温度处于相对高温时, 遥感反演的温度值高于冰川表面实测温度值, 当冰川表面处于相对低温时, 遥感反演值偏低, 这可能受近地气温影响, 与 Wu 等<sup>[3]</sup> 在七一冰川反演一致。虽然本文反演结果表明劈窗算法精度较高, 但仅针对研究区特定环境, 劈窗算法能否广泛应用于其他区域不能确定。

表 6 五种方法温度反演结果与 4410 m 气象站实测数据对比  
Tab. 6 Comperation between five LST retrieval results and the 4410 m AWS measurement data

时间	4410 m AWS/K	反演值/K					绝对误差/K				
		MW	SC	SC_T	SW_JM	SW_R	MW	SC	SC_T	SW_JM	SW_R
2013-07-19	273.96	278.96	278.75	279.47	272.66	274.96	5.00	4.79	5.52	1.01	1.30
2013-08-04	274.37	278.96	278.75	279.47	272.66	274.96	4.59	4.37	5.10	0.59	1.71
2013-10-07	271.17	271.70	271.77	272.11	270.76	270.03	0.54	0.60	0.95	1.14	0.41
2013-10-23	264.79	265.29	265.38	266.30	266.48	263.81	0.50	0.59	1.51	0.98	1.70
2013-12-10	274.37	276.66	276.63	276.99	272.81	273.74	2.30	2.26	2.62	0.63	1.55
2014-01-11	256.47	254.53	254.30	254.77	254.73	253.12	1.94	2.18	1.71	3.35	1.75
2014-03-16	251.73	250.25	249.80	249.84	249.94	248.23	1.48	1.93	1.90	3.50	1.80
2014-05-03	268.98	269.23	269.36	270.01	269.49	268.81	0.24	0.38	1.03	0.17	0.50
2014-05-19	271.74	273.23	273.39	273.75	273.07	272.16	1.50	1.65	2.01	0.42	1.33
2014-09-08	272.96	276.04	276.32	276.69	276.14	274.84	3.07	3.35	3.72	1.88	3.18
平均值				—			2.12	2.21	2.61	1.37	1.52

表 7 五种方法温度反演结果与 4770 m 气象站实测数据对比  
Tab. 7 Comparison between five LST retrieval results and the 4770 m AWS measurement data

时间	4770 m AWS/K	反演值/K					绝对误差/K				
		MW	SC	SC_T	SW_JM	SW_R	MW	SC	SC_T	SW_JM	SW_R
2013-07-19	273.61	279.99	279.79	280.43	277.63	275.38	4.61	4.48	4.90	4.93	0.61
2013-08-04	274.02	280.03	279.79	280.43	277.63	275.38	6.02	5.77	6.42	3.62	1.36
2013-10-07	267.88	269.80	269.92	270.42	268.40	269.75	1.92	2.05	2.54	0.52	1.87
2013-10-23	262.40	262.87	260.84	263.87	260.84	264.56	0.47	1.56	1.47	1.56	2.16
2013-12-10	273.99	277.44	277.42	277.80	275.36	274.50	3.45	3.43	3.80	1.37	0.51
2014-01-11	254.55	253.66	253.45	253.92	252.03	254.24	0.89	1.10	0.63	2.52	0.32
2014-03-16	249.04	248.62	248.20	247.96	246.21	248.80	0.42	0.84	1.08	2.83	0.25
2014-05-03	268.93	266.84	266.83	267.40	266.42	266.75	2.08	2.10	1.53	2.51	2.17
2014-05-19	269.22	271.82	271.61	272.37	271.07	271.88	2.60	2.38	3.15	1.85	2.65
2014-09-08	269.85	271.79	272.05	272.64	270.45	272.55	1.94	2.20	2.79	0.60	2.69
平均值				—			2.44	2.59	2.83	2.23	1.57

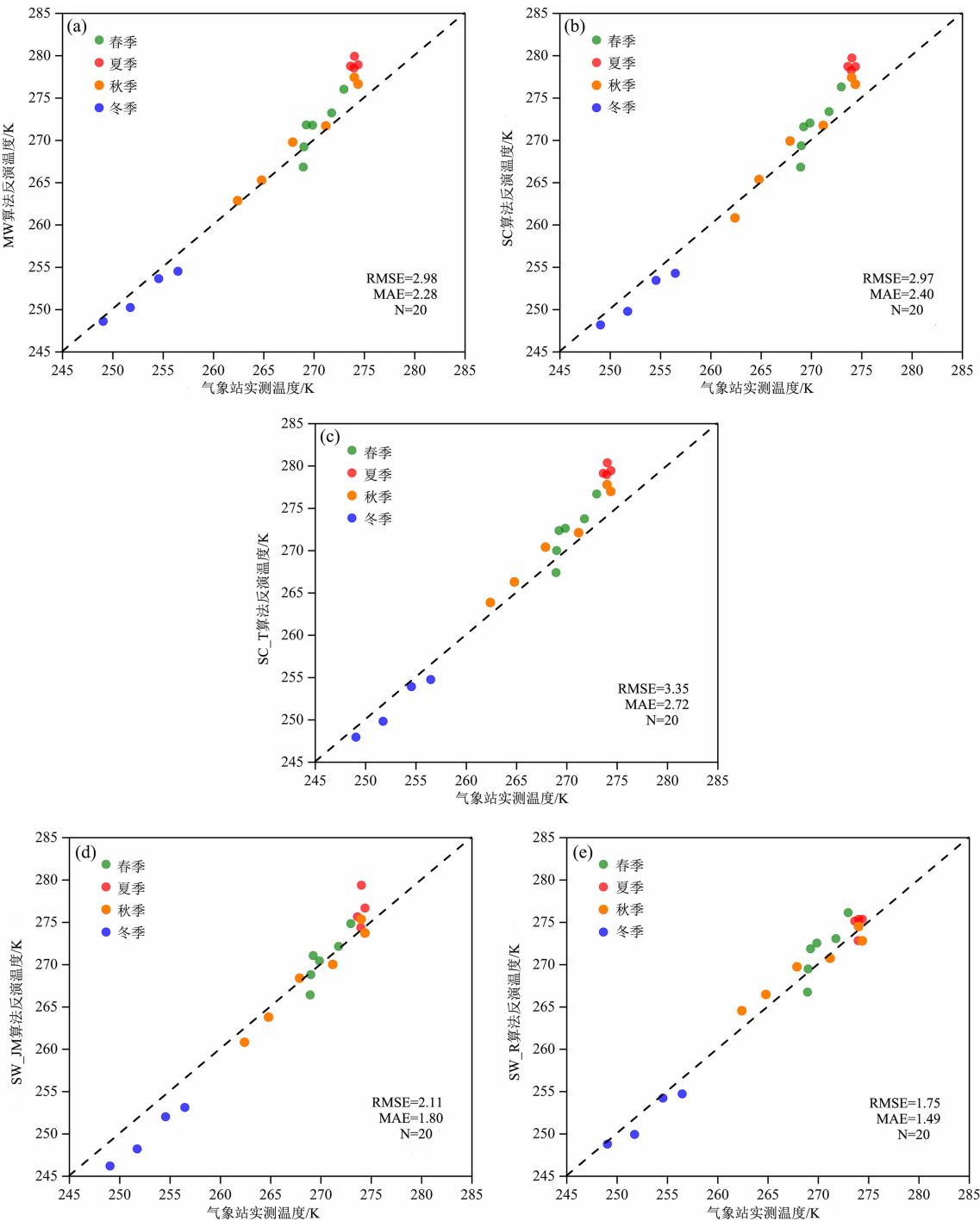


图 2 五种表面温度算法反演结果与气象站实测值对比：

(a)MW 算法,(b)SC 算法,(c)SC\_T 算法,(d)SW\_JM 算法,(e)SW\_R 算法

Fig. 2 Comparison between five LST retrieval results and the AWS measurements;

(a)MW method,(b)SC method,(c)SC\_T method,(d)SW\_JM method,(e)SW\_R method

不同算法在各季节的反演精度也不相同(表 8)。结果表明,夏季各算法均表现较差,平均 RMSE 为 4.16 K、MAE 为 3.19 K,远高于其他季节。其原

因可能是验证点位于冰舌或冰川边缘部分,夏季消融期受周围裸岩较高温度以及边缘区域复杂地形带来多次反射效应的影响,导致验证点的辐射亮度值



表 8 不同季节各遥感算法反演结果评价

Tab. 8 Evaluation results of LST retrieval in different seasons

温度反演算法	春季(3~5月)		夏季(6~8月)		秋季(9~11月)		冬季(12~2月)	
	RMSE/K	MAE/K	RMSE/K	MAE/K	RMSE/K	MAE/K	RMSE/K	MAE/K
MW	2.11	1.91	5.08	5.05	1.90	1.53	1.32	1.18
SC	2.20	2.01	4.90	4.87	2.01	1.75	1.61	1.51
SC_T	2.55	2.37	5.52	5.49	2.35	2.15	1.42	1.33
SW_JM	1.52	1.24	3.11	2.54	1.10	1.03	3.08	3.05
SW_R	2.28	2.09	2.22	1.88	1.52	1.37	1.27	1.03
平均值	2.13	1.92	4.16	3.97	1.77	1.57	1.74	1.62

高于实际值<sup>[3]</sup>。同时夏季验证点的水汽含量明显高于其他季节(表1),这可能是大气水汽含量影响算法的反演结果<sup>[28]</sup>,尤其是 SC 和 SW\_JM 算法,当大气水汽含量大于  $3\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$  时,SC 算法的精度会受到明显影响,导致夏季反演精度较差。冬季是各算法反演结果最好的季节,平均 RMSE 为 1.74 K, MAE 为 1.62 K,其中 SW\_R 精度最高, RMSE 为 1.27 K、MAE 为 1.03 K,但对于 SW\_JM 算法,冬季精度明显低于其他算法, RMSE 为 3.08 K, MAE 为 3.05 K。春季和秋季各算法反演结果介于夏季和冬季之间,其中秋季精度高于春季,平均 RMSE 为 1.77 K, MAE 为 1.57 K,各季节反演精度与大气水汽含量(表1)呈现一定的负相关关系,水汽含量较高时,整体反演效果较差。尽管 SW\_JM 算法在冬季的反演结果最差,但 SW\_JM 算法在春季和秋季的精度明显高于其他四种算法,在春季的 RMSE 为 1.52 K, MAE 为 1.24 K,而在秋季的 RMSE 为 1.10 K, MAE 为 1.03 K。根据表 8,可以针对不同季节使用相应精度高的反演算法反演表面温度,考虑到各季节实测数据数量较少,还需要更多数据验证。

5 冰川表面温度反演参数敏感性分析

5.1 不同冰雪类型发射率对出射角度敏感性分析

分析当出射角为  $0^{\circ}\sim75^{\circ}$  时, TIRS 10 波段( $10.60\sim11.19\text{ }\mu\text{m}$ )和 11 波段( $11.50\sim12.51\text{ }\mu\text{m}$ )五种冰雪类型(细粒雪、中粒雪、粗粒雪、雪壳和裸冰)的发射率敏感性。如图 3 所示,当出射角在  $0^{\circ}\sim75^{\circ}$  时,10 波段的冰雪发射率为  $0.796\sim0.993$ , 11 波段的冰雪发射率范围为  $0.727\sim0.991$ ;五种冰

雪类型的发射率在 10 波段均高于 11 波段,随着雪粒径的增加,发射率之间的差异增大。当出射角为  $0^{\circ}$  时, TIRS 10 波段的裸冰发射率较 11 波段高出约 0.027,而对于细粒雪仅高出 0.001。无论是 10 波段还是 11 波段,当出射角  $<40^{\circ}$  时,冰雪发射率均基本不变,当出射角  $>40^{\circ}$  时,随着出射角的增加,冰雪发射率均呈指数式降低。其中细粒雪的发射率随着出射角度变化最为缓慢,出射角从  $0^{\circ}$  增加至  $75^{\circ}$ ,发射率仅下降了约 0.01;相反,裸冰对出射角的敏感性最高,当出射角从  $40^{\circ}$  增加至  $75^{\circ}$ ,10 波段和 11 波段的裸冰发射率大约降低了 0.22。中粒雪、粗粒雪和雪壳的发射率对出射角的敏感性介于细粒雪和裸冰之间。

5.2 不同反演算法对冰雪发射率敏感性分析

发射率是表面温度反演的关键参数,本文以 2014 年 3 月 16 日的 TIRS 数据为例,通过设定不同发射率且保持其他参数不变,分析各算法的冰雪发射率敏感性。由于冰雪发射率较高,变化幅度较小,一般情况下发射率分布在  $0.96\sim0.99$ (图 3),因此本文将地表发射率设置为  $0.955\sim1$  间隔为 0.005 的 10 个值(表 9),基本覆盖不同冰雪类型发射率变化范围。

冰雪发射率敏感性分析结果如表 9 所示,五种算法的发射率和反演温度值之间均呈线性关系。除 SC\_T 算法之外,其余 4 种算法随冰雪发射率的增加,反演的表面温度值均呈线性降低趋势,它们对发射率的敏感性接近。冰雪发射率每增加 0.05, MW、SC、SW\_JM 和 SW\_R 算法的反演温度值分别降低 0.286 K、0.285 K、0.269 K 和 0.366 K。对于 SC\_T 算法,随着发射率增加,其反演的表面温度呈微弱的

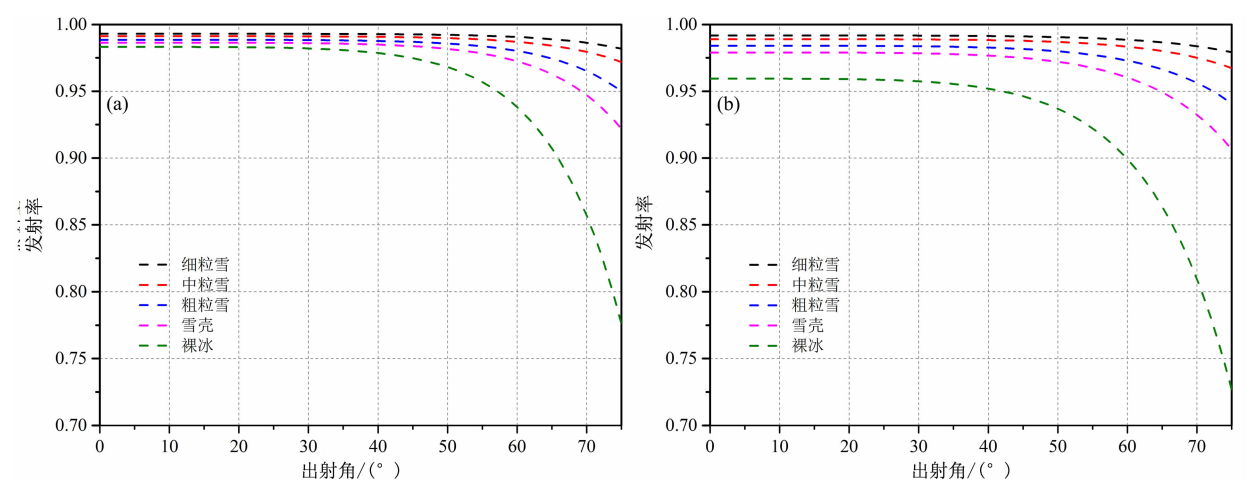


图 3 TIRS 热红外传感器不同冰雪类型的地表发射率随出射角度变化：

(a) TIRS 10 波段；(b) TIRS 11 波段

Fig. 3 Variations in emissivity integrated over the TIRS thermal infrared band with exitance angle for different types of snow and ice;

(a) TIRS Band 10; (b) TIRS Band 11

表 9 不同发射率下的五种算法温度反演结果

Tab. 9 The results of five LST retrieval results for different changes of emissivity

发射率	各算法温度反演结果/K				
	MW	SC	SC_T	SW_JM	SW_R
0.955	271.201	271.330	268.596	270.650	272.011
0.960	270.903	271.033	268.599	270.381	271.630
0.965	270.609	270.738	268.603	270.112	271.253
0.970	270.317	270.447	268.606	269.843	270.879
0.975	270.029	270.159	268.609	269.573	270.510
0.980	269.743	269.874	268.612	269.304	270.144
0.985	269.461	269.592	268.615	269.035	269.782
0.990	269.181	269.313	268.618	268.766	269.424
0.995	268.904	269.036	268.621	268.497	269.069
1.000	268.630	268.762	268.624	268.228	268.718
平均误差	0.286	0.285	0.003	0.269	0.366

线性升高趋势,冰雪发射率从 0.95 增加到 1,SC\_T 算法反演结果升高了 0.03 K。一般而言,冰雪发射率的增加会使反演的表面温度降低,尤其是对于低大气含水量的高海拔冰雪表面,SC\_T 算法具有一定的局限性。

5.3 大气水汽含量的敏感性分析

MW 和 SW\_R 算法中的水汽含量是通过计算大气透过率间接影响反演结果,SC、SC\_T 和 SW\_JM 算法中水汽含量直接参与表面温度反演的计算。本

文以 2014 年 3 月 16 日的 TIRS 数据为例,假设不同水汽含量浓度但保持其他参数不变,分析高海拔冰川低水汽含量情况下各算法对水汽含量的敏感性。由于冰川区处于高海拔地区,气候干燥少雨雪,多数季节水汽含量较低,故将大气水汽含量设为  $0.010\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$  以及  $0.100\sim0.900\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$  间隔为 0.1 的 9 个值。

不同大气水汽含量的敏感性分析结果如表 10 所示:单通道算法中,MW 和 SC\_T 算法反演温度随

表 10 不同水汽含量下五种算法温度反演结果  
Tab. 10 The results of five LST retrieval for different change of water vapor content

水汽含量/(g · cm <sup>-2</sup> )	各算法温度反演温度/K				
	MW	SC	SC_T	SW_JM	SW_R
0.010	269.233	269.407	268.607	268.802	271.893
0.100	269.232	269.402	268.612	268.807	270.579
0.200	269.231	269.369	268.616	268.813	269.593
0.300	269.23	269.308	268.619	268.819	268.914
0.400	269.229	269.22	268.621	268.825	268.432
0.500	269.228	269.103	268.622	268.831	268.087
0.600	269.228	268.958	268.622	268.837	267.837
0.700	269.227	268.786	268.62	268.843	267.658
0.800	269.227	268.586	268.618	268.849	267.532
0.900	269.227	268.357	268.614	268.855	267.447
平均误差	0.001	0.116	0.003	0.006	0.490

水汽含量的变化影响最小,大气水汽含量每变化 0.1 g · cm<sup>-2</sup>,MW 算法反演温度平均变化 0.001 K,当水汽含量高于 0.6 g · cm<sup>-2</sup>时,MW 算法的温度反演结果几乎不发生变化;大气水汽含量每变化 0.1 g · cm<sup>-2</sup>,SC\_T 算法反演温度平均变化 0.003 K;当大气水汽含量在 0.01 ~ 0.3 g · cm<sup>-2</sup>时,SC 算法敏感性较低,但随水汽含量的升高,其敏感性增加。SW\_JM 算法对大气水汽含量敏感性较低,水汽含量每增加 0.1 g · cm<sup>-2</sup>,反演温度升高 0.05 K,呈线性关系;SW\_R 算法对大气水汽含量敏感性较高,大气水汽含量每增加 0.1 g · cm<sup>-2</sup>,SW\_R 算法温度反演平均升高 0.49 K,随大气水汽含量的增加敏感性逐渐降低。

6 结论

本文基于祁连山七一冰川 2013 年 5 月至 2014 年 9 月的 10 景 Landsat 8 TIRS 影像,使用五种表面温度反演算法获取冰川表面温度,并与两个自动气象站验证点的冰川表面实测值对比分析。结果表明:

(1)在高海拔冰川表面,TIRS 数据在完成杂散光校正后,劈窗算法的精度高于单通道算法,其中 Offer Rozenstein 劈窗算法误差最小,RMSE 为 1.75 K,MAE 为 1.49 K。

(2)夏季消融期各算法均有较大偏差,可能受

周围裸岩较高的温度以及边缘区域复杂地形带来多次反射效应的影响;冬季是各算法反演误差最小的季节。

(3)冰雪发射率与冰雪类型和出射角度有关,对于 TIRS 10 波段和 11 波段,当出射角 < 40°时,不同类型的冰雪发射率变化很小;当出射角 > 40°时,随着出射角的增加,冰雪发射率均呈指数式下降,且雪粒径越大发射率越低越快。

(4)在高海拔冰川的高发射率、低水汽含量环境下,覃志豪单窗算法对大气水汽含量敏感性最低,Offer Rozenstein 劈窗算法对大气水汽含量和发射率的敏感性相对较高,而 Jordi Cristóbal 普适性单通道改进算法存在一定局限性。

本文对比了不同表面温度反演算法在冰川表面的精度和适用性,但存在以下不足:首先,冰川表面恶劣环境造成气象站实测数据缺失,使一年内各季节的验证数据较少,未来将使用更长时间序列数据对各算法进行全面评价;其次,反演冰川表面温度时需进一步考虑冰川物理过程,冰雪反射率计算时增加更多的实地观测验证;最后,各算法在夏季消融期较大偏差的改进也是日后工作的重点。

**致谢:**感谢 USGS 提供的遥感数据,感谢多名审稿人对本文提出的意见和建议,感谢张泉博士在本文构思和写作过程中提供的帮助。

## 参考文献 (References)

- [1] ANDERSON M C, NORMAN J M, KUSTAS W P, et al. A thermal-based remote sensing technique for routine mapping of land-surface carbon, water and energy fluxes from field to regional scales [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008 (112): 4227–4241. DOI: 10.1016/j.rse.2008.07.009
- [2] KALMA J D, MCVICAR T R, MCCABE M F. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data [J]. *Surveys in Geophysics*, 2008, 29 (4): 421–469. DOI: 10.1007/s10712-008-9037-z
- [3] WU Yuwei, WANG Ninglian, HE Jianqiao, et al. Estimating mountain glacier surface temperatures from Landsat – ETM + thermal infrared data: a case study of Qiyi glacier, China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 163:286–295. DOI: 10.1016/j.rse.2015.03.026
- [4] ZHANG Renhua, TIAN Jing, SU Hongbo, et al. Two improvements of an operational two-layer model for terrestrial surface heat flux retrieval [J]. *Sensors*, 2008, 8 (10): 6165–6187. DOI: 10.3390/s8106165
- [5] DOUSSET B, GOURMELON F. Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2003, 58 (1–2): 43–54. DOI: 10.1016/S0924-2716(03)00016-9
- [6] WENG Qihao. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: methods, applications, and trends [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64 (4): 335–344. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007
- [7] HANSEN J, RUEDY R, SATO M, et al. Global surface temperature change [J]. *Reviews of Geophysics*, 2010, 48 (4): RG4004. DOI: 10.1029/2010RG000345
- [8] HOLDERNESS T, BARR S, DAWSON R, et al. An evaluation of thermal Earth observation for characterizing urban heatwave event dynamics using the urban heat island intensity metric [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34 (3): 864–884. DOI: 10.1080/01431161.2012.714505
- [9] 施雅风, 黄茂桓, 任炳辉. 中国冰川概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1988: 105–119. [SHI Yafeng, HUANG Maohuan, REN Binghui. An introduction to the glaciers in China [M]. Beijing: Science Press, 1988: 105–119]
- [10] 黄茂桓. 我国冰川温度研究 40 年 [J]. 冰川冻土, 1999, 21 (3): 193–199. [HUANG Maohuan. Forty year's study of glacier temperature in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21 (3): 193–199]
- [11] 王宁练, 贺建桥, 吴红波, 等. 青藏高原昆仑山求勉雷克塔格冰川春季表面温度空间变化特征及其影响因素 [J]. 冰川冻土, 2013, 35 (5): 1088–1094. [WANG Ninglian, HE Jianqiao, WU Hongbo, et al. Spatial variation in spring surface temperature of the Qiumianleiketage Glacier in the Kunlun Mountains, Tibetan Plateau, and their influencing factors [J], *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35 (5): 1088–1094] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0122
- [12] LI Zhaoliang, TANG Bohui, WU Hua, et al. Satellite-derived land surface temperature: current status and perspectives [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 131: 14–37. DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.008
- [13] QIN Zhihao, KARNIELI A, BERLINER P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22 (18): 3719–3746. DOI: 10.1080/01431160010006971
- [14] JIMÉNEZ-MUÑOZ J C, SOBRINO J A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (D22): 4688. DOI: 10.1029/2003JD003480
- [15] ROY D P, WULDER M A, LOVELAND T R, et al. Landsat – 8: science and product vision for terrestrial global change research [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 145: 154–172. DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.001
- [16] JIMENEZ-MUNOZ J C, SOBRINO J A, SKOKOVIC D, et al. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11 (10): 1840–1843. DOI: 10.1109/LGRS.2014.2312032
- [17] WANG Fei, QIN Zhihao, SONG Caiying, et al. An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7 (4): 4268–4289. DOI: 10.3390/rs70404268
- [18] CRISTOBAL J, JIMENEZ-MUNOZ J C, PRAKASH A, et al. An improved single-channel method to retrieve land surface temperature from the Landsat-8 thermal band [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10 (3): 431. DOI: 10.3390/rs10030431
- [19] 孟翔晨, 历华, 杜永明, 等. Landsat 8 地表温度反演及验证——以黑河流域为例 [J]. 遥感学报, 2018, 22 (5): 857–871. [MENG Xiangchen, LI Hua, DU Yongming, et al. Retrieval and validation of the land surface temperature derived from Landsat 8 data: a case study of the Heihe River Basin [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22 (5): 857–871] DOI: 10.11834/jrs.20187411
- [20] ROZENITEIN O, QIN Zhihao, DERIMIAN Y, et al. Derivation of land surface temperature for Landsat – 8 TIRS using a split window algorithm [J]. *Sensors*, 2014, 14 (4): 5768–5780. DOI: 10.3390/s140405768
- [21] YU Xiaolei, GUO Xulin, WU Zhaocong. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6 (10): 9829–9852. DOI: 10.3390/rs6109829
- [22] 宋挺, 段峥, 刘军志, 等. Landsat 8 数据地表温度反演算法对

- 比[J]. 遥感学报, 2015, 19(3): 451–464. [SONG Ting, DUAN Zheng, LIU Junzhi, et al. Comparison of four algorithms to retrieve land surface temperature using Landsat 8 satellite [J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(3): 451–464] DOI: 10.11834/jrs.20154180
- [23] GARCIA-SANTOS V, CUXART J, MARTINEZ-VILLAGARASA D, et al. Comparison of three methods for estimating land surface temperature from Landsat 8-TIRS sensor data [J]. Remote Sensing, 2018, 10(9): 1450. DOI: 10.3390/rs10091450
- [24] WANG Lei, LU Yao, YAO Yunlong. Comparison of three algorithms for the retrieval of land surface temperature from Landsat 8 images [J]. Sensors, 2019, 19(22): 5049. DOI: 10.3390/s19225049
- [25] 赵伟, 李爱农, 张正健, 等. 基于 Landsat8 热红外遥感数据的山地地表温度地形效应研究[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(1): 63–73. [ZHAO Wei, LI Ainong, ZHANG Zhengjian, et al. A study on land surface temperature terrain effect over mountainous area based on Landsat 8 thermal infrared data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(1): 63–73] DOI: 10.11873/j. issn. 1004–0323. 2016. 1. 0063
- [26] BARSİ J A, SCHOTT J R, HOOK S J, et al. Landsat-8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration [J]. Remote Sensing, 2014, 6(11): 11607–11626. DOI: 10.3390/rs6111607
- [27] 徐涵秋. 新型 Landsat 8 卫星影像的反射率和地表温度反演[J]. 地球物理学报, 2015, 58(3): 741–747. [XU Hanqiu. Retrieval of the reflectance and land surface temperature of the newly-launched Landsat 8 satellite [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(3): 741–747] DOI: 10.6038/cjg20150304
- [28] 徐涵秋, 林中立, 潘卫华. 单通道算法地表温度反演的若干问题讨论—以 Landsat 系列数据为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(4): 487–492. [XU Hanqiu, LIN Zhongli, PAN Weihua. Some issues in land surface temperature retrieval of Landsat thermal data with the single-channel algorithm [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(4): 487–492] DOI: 10.13203/j. whugis20130733
- [29] 徐涵秋. Landsat 8 热红外数据定标参数的变化及其对地表温度反演的影响[J]. 遥感学报, 2016, 20(2): 229–235. [XU Hanqiu. Change of Landsat 8 TIRS calibration parameters and its effect on land surface temperature retrieval [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(2): 229–235] DOI: 10.11834/jrs.20165165
- [30] 中国科学院高山冰雪利用研究队. 祁连山现代冰川考察报告[M]. 北京: 科学出版社, 1958: 52–56. [Investigation team on utilization of snow and ice resources in mountain regions, Chinese Academy of Sciences. Investigations report of glaciers in the Qilian Mountains [M]. Beijing: Science Press, 1958: 52–56]
- [31] WU Xuejiao, HE Jianqiao, JIANG Xi, et al. Analysis of surface energy and mass balance in the accumulation zone of Qiyi Glacier, Tibetan Plateau in an ablation season [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(9): 785. DOI: 10.1007/s12665–016–5591–8
- [32] YAO Tandong, THOMPSON L, YANG Wei, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings [J]. Nature Climate Change, 2012, 2(9): 663–667. DOI: 10.1038/NCLIMATE1580
- [33] 王宁练, 贺建桥, 蒲健辰, 等. 近 50 年来祁连山七一冰川平衡线高度变化研究[J]. 科学通报, 2010, 55(32): 3107–3115. [WANG Ninglian, HE Jianqiao, PU Jianchen, et al. Variations in equilibrium line altitude of the Qiyi Glacier, Qilian Mountains, over the past 50 years [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(32): 3107–3115] DOI: 10.1017/S0004972710001772
- [34] 王坤, 井哲帆, 吴玉伟, 等. 祁连山七一冰川表面运动特征最新观测研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 537–545. [WANG Kun, JING Zhefan, WU Yuwei, et al. Latest survey and study of surface flow features of the Qiyi Glacier in the Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 537–545] DOI: 10.7522/j. issn. 1000–0240. 2014. 0064
- [35] GAO Bocai, KAUFMAN Y J. MODIS atmosphere L2 water vapor product [EB/OL]. [http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD05\\_L2.006.html](http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD05_L2.006.html), 2021–1–6.
- [36] CHEN Feng, ZHAO Xiaofeng, YE Hong, et al. Retrieving land surface temperature from Landsat TM using different atmospheric products as ancillary data [C]. Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services, 2011: 421–426. DOI: 10.1109/ICSDM.2011.5969079
- [37] PRATA A J. Land surface temperatures derived from the advanced very high resolution radiometer and the along-track scanning radiometer 1. theory [J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(D9): 16689–16702. DOI: 10.1029/93JD01206
- [38] SNYDER W C, WAN Z, ZHANG Y, et al. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(14): 2753–2774. DOI: 10.1080/014311698214497
- [39] SOBRINO J A, RAISSOUNI N. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(2): 353–366. DOI: 10.1080/014311600210876
- [40] HORI M, AOKI T, TANIKAWA T, et al. Modeling angular-dependent spectral emissivity of snow and ice in the thermal infrared atmospheric window [J]. Applied Optics, 2013, 52(30): 7243–7255. DOI: 10.1364/AO.52.007243
- [41] FRENIERRE J L, MARK B G. A review of methods for estimating the contribution of glacial meltwater to total watershed discharge [J]. Progress in Physical Geography, 2014, 38(2): 173–200. DOI: 10.1177/0309133313516161

[42] 陆品廷. 基于 Landsat 8 数据的青藏高原地区地表温度反演研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018. [LU Pinyan. Study on land surface temperature retrieval of Tibetan Plateau from

Landsat 8 data [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2018] DOI: CNKI: CDMD; 2. 1018. 130709

## Comparison of Algorithms for Retrieving Mountain Glacier Surface Temperature from Remote Sensing Data: A Case Study on the Qiyi Glacier in the Qilian Mountains, China

QIE Yufan<sup>1,2</sup>, WANG Ninglian<sup>1,2,3\*</sup>, WU Yuwei<sup>1,2</sup>, Chen Anan<sup>1,2</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China;

2. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China;

3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Changes in glacier surface temperature can affect the thermal and the surface ablation statuses of a glacier. Landsat series satellites provide a huge and high spatial resolution remote sensing data, which has been widely used for the study on the temporal and spatial changes of the Earth surface temperature, including the glacier surface temperature. Some algorithms for retrieving the land surface temperature from the remote sensing data have been developed, such as single-channel algorithms (for examples, Qin Zhihao's algorithm, Juan C. Jiménez-Muñoz's algorithm and Jordi Cristóbal's algorithm) and split window algorithms (for examples, Juan C. Jiménez-Muñoz's algorithm and Offer Rozenstein algorithm). In this paper, we evaluated the accuracies and the adaptabilities of these algorithms for estimations of the glacier surface temperature based on the Landsat8 Thermal Infrared Sensor data and the observed glacier surface temperature data by the autonomous weather stations on the Qiyi Glacier in the Qilian Mountains in China over the period of May 2013 through September 2014. The results indicated that: (1) The accuracy of the split window algorithm was higher than that of the single channel algorithm, among which, the error of Offer Rozenstein SW\_R algorithm was the smallest, with a root-mean-square error (RMSE) of 1.75 K and mean absolute error (MAE) of 1.49 K, while that of Jordi Cristóbal SC\_T algorithm was higher, with RMSE of 3.35 K and MAE of 2.72 K. (2) All the retrieval algorithms had larger errors in summer melting season but smaller in winter. (3) The Qin Zhihao MW algorithm had the lowest sensitivity to the variations in water vapor, while the Offer Rozenstein SW\_R algorithm had a higher sensitivity to water vapor and emissivity, and there were some limitations of Jordi Cristóbal SC\_T algorithm for high altitude glacier areas. This comparative analysis provides a basis for selecting a suitable algorithm for retrieving the glacier surface temperature by using the remote sensing data.

**Key words:** glacier surface temperature; Landsat 8; Qiyi Glacier