

基于改进的小波变换的南极冰盖冻融探测

王星东^{1,2}, 熊章强¹, 李新武², 梁 雷²

(1. 中南大学有色金属矿预测教育部重点实验室, 地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083;

2. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094)

摘 要: 小波变换模型算法中的双高斯模型拟合干湿雪分类的最优阈值时, 受初始值影响且典型样本区的选取比较费时, 针对这些缺点提出了自动阈值分割的改进的小波变换算法, 即用广义高斯模型自动拟合干湿雪分类的最优阈值. 该算法继承和发展了冰盖冻融探测无需依赖于实测数据的优点, 更好地实现了南极地区冰盖冻融监测系统建设的业务化运行目标. 通过对改进前后的结果对比分析表明: 改进后的方法与原方法相比, 不仅提高了冰盖冻融探测方法的计算效率、实用性和可操作性, 而且还在一定程度上提高了冰盖冻融探测的精度.

关键词: 冰盖冻融探测; 最优阈值; 改进的小波变换; 广义高斯模型

中图分类号: P237 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)02-0402-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.02.030

Antarctic Ice-Sheet Freeze-Thaw Detection Based on Improved Wavelet Transform

WANG Xing-dong^{1,2}, XIONG Zhang-qiang¹, LI Xin-wu², LIANG Lei²

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,

School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: When the double-Gaussian model of the current wavelet-transform algorithm fits the optimal threshold value of the dry and wet snow classification, it is easily affected by the initial value and has the shortcomings of consuming more time in selecting the typical sample zones. According to the fact, this paper proposed the improved wavelet-transform algorithm for the automatic threshold segmentation, that is, generalized Gaussian model automatically fits the optimal wet and dry snow classification threshold. The algorithm inherits and develops the advantage of ice-sheet freeze-thaw detection, which does not rely on the measured data and achieves the goal of Antarctic ice-sheet monitoring system business more effectively. By comparing and analyzing of the two algorithms, we can see that the improved algorithm improves the computational efficiency, usability and operability in the ice-sheet freeze-thaw detection as well as the accuracy of detection to some extent.

Key words: ice-sheet freeze-thaw detection; optimal threshold; improved wavelet transform; generalized Gaussian model

1 引言

极区控制着大气与地表的热量、水汽和能量交换, 直接影响着全球大气环流和气候, 是全球气候变化的关键因素. 南极冰盖与相邻地球圈层的相互作用对全球气候和环境有巨大影响. 南极冰盖的消融将引起雪表湿度的变化, 进而引起边缘冰架的崩塌和改变冰流的运动. 通过遥感手段有效检测南极冰盖冻融的分布, 对全球气候和环境的变化研究具有极大的促进作用. 国际上已有多家科研机构开展了冰盖表面冻融探测的方法和应用研究. 总结起来, 典型的冰盖冻融探测算法主要有以下几类: (1) 不依赖实地观测值的边缘检测的冰盖冻融探测方法^[1~3]; (2) 需要实地观测数据和参数输入的物理

模型基的冰盖冻融探测方法^[4~6]; (3) 需要野外测量且物理背景不强的图像处理冰盖冻融探测方法^[7,8].

南极特殊的地理位置和恶劣的气候环境, 急需发展不依赖于实地观测数据的简单、易操作的冰盖冻融探测方法. 本文针对 Liu^[1,2]等人提出的基于小波模型算法的边缘检测的冰盖冻融探测方法进行了改进, 克服了原算法中对有些边缘的突变不理想和双高斯模型拟合干湿雪分类的阈值时受初始值影响且典型样本区的选取比较费时的缺点, 提出了广义高斯模型自动拟合干湿雪分类的最优阈值的改进的小波变换算法. 该算法具有较高的计算效率、实用性和可操作性, 为南极冰盖冻融探测业务化的自动化运行提供了方法学补充.

2 研究区域概况与数据源

南极总面积约 1400 万平方公里,约占世界陆地面积的 9.4%。全球冰雪量的 90% 冻结在南极,南极大陆冰盖的平均厚度约 2400m,最大厚度达 4800m。南极大陆是世界最冷的陆地,冬季月平均气温约 -59.8°C 。南极大陆 98% 的面积常年被冰雪覆盖,部分冰盖延伸到海洋形成冰架。近年来,在全球变暖的趋势下,冰架前缘崩裂正导致冰架形态发生剧烈的变化。卫星观测结果显示,南极半岛冰架前缘存在突然崩裂现象,在过去 20 多年来,已造成冰架面积减少了 12500 平方公里以上。

本文主要使用 1988~2008 年搭载于 F8、F11 和 F13 平台上的南极地区的 SSM/I 数据。已知这三种平台的重叠时间为 1987 年 7 月 10 日至 8 月 20 日和 1995 年 3 月至 9 月,利用这些重合数据可对三个平台上的传感器数据进行归一化处理,利用(1)可以把数据从 F11 和 F13 平台归一化到 F8 平台。

$$T_1 = a * T_2 + b \quad (1)$$

其中: T_1 为 F8 平台上的 19GHz 的水平极化亮温, T_2 为平台 F11 和 F13 上对应的亮温, $a = 1.008$ 、 $b = -1.17$ 为归一化系数。

对于温度数据,常用的有间隔 10 分钟和间隔 3 小时的温度数据。间隔 10 分钟的温度数据是未经校准的,受仪器和天气的影响严重。间隔 3 小时的温度数据是经过人工校准的,已剔除一些错误数据。本文采用间隔 3 小时的温度数据,在剔除异常数据的基础上做日平均,用于冻融结果的地面验证。

3 改进的小波变换的冰盖冻融探测

3.1 小波变换的冰盖冻融探测算法

小波变换模型的冰盖冻融探测算法的基本原理^[1,2]:长时间序列亮温数据的剧烈变化边缘反应了冰盖的融化或者冻结的开始,每一年融化开始时间为时间轴上第一个亮温数据剧烈上升的边缘,结束时间为时间轴上最后一个亮温数据剧烈下降的边缘,而融化持续时间为一年中每段融化持续时间的总和^[9,10]。基本步骤如下:(1)对长时间序列亮温数据进行预处理;(2)运用小波变换对预处理后的亮温数据进行多尺度分解;(3)为区分由噪声产生的边缘和由融化、冻结的发生产生的边缘,利用双高斯曲线拟合的方法得到干湿雪分类的最优边缘阈值;(4)利用最优边缘阈值得到冻融开始、结束和持续时间;(5)运用空间邻域纠错的方法来纠错由噪声引起的错误,从而得到冻融的空间分布及融化开始、结束和持续时间分布图。

双高斯模型拟合干湿雪分类的最优边缘阈值方法的主要缺点如下:(1)有些剧烈变化点和非剧烈变化点

的分布模型不一定满足双高斯模型;(2)对于拟合采用的 Levenberg-Marquardt 算法,输入的初始值不同,得到迭代的结果不同,结果的好坏与初始值的输入有关;(3)算法过程繁琐。

3.2 广义高斯模型的自动阈值确定

广义高斯模型引入形状因子,可处理更多不同形状的曲线,与双高斯模型相比有较大的进步。该模型的原理如下:设 $h(X_l)$ ($X_l = 0, 1, \dots, L-1$) 为一幅灰度图像的直方图, L 表示图像可能的灰度级。为了在选定的样本内通过广义高斯模型得到干湿雪分类的最优阈值 T^* ,将图像二值化,则 $h(X_l)$ 可以看成是灰度图像中干雪和湿雪点的混合概率密度函数 $p(X_l)$ 。为了求出干湿雪划分的最优阈值 T^* ,在此引入 Kilter 和 Illingworth 1986 年提出的一种基于最小错误率的贝叶斯理论的阈值选择方法^[11]。定义准则函数 $J(T)$ 描述平均的正确分类性能^[11]:

$$J(T) = \sum_{X_l=0}^T h(X_l) [b_1(T) |X_l - m_1(T)|]^{\beta_1(T)} + \sum_{X_l=T+1}^{L-1} h(X_l) [b_2(T) |X_l - m_2(T)|]^{\beta_2(T)} + H(\Omega, T) - [P_1(T) \ln a_1(T) + P_2(T) \ln a_2(T)] \quad (2)$$

其中:

$P_1(T) = \sum_{X_l=0}^T h(X_l)$ 和 $P_2(T) = 1 - P_1(T)$ 分别是干雪和湿雪的先验概率。

$m_1(T) = \frac{1}{P_1(T)} \sum_{X_l=0}^T X_l h(X_l)$ 和 $m_2(T) = \frac{1}{P_2(T)} \sum_{X_l=T+1}^{L-1} X_l h(X_l)$ 分别是干雪和湿雪的均值。

$\sigma_1^2(T) = \frac{1}{P_1(T)} \sum_{X_l=0}^T [X_l - m_1(T)]^2 h(X_l)$ 和 $\sigma_2^2(T) = \frac{1}{P_2(T)} \sum_{X_l=T+1}^{L-1} [X_l - m_2(T)]^2 h(X_l)$ 分别是干雪和湿雪的方差。

$H(\Omega, T) = -2[P_1(T) \ln P_1(T) + P_2(T) \ln P_2(T)]$ 是类别 $\Omega = \{\omega_1, \omega_2\}$ 的熵。

β_i 是 $p(X_l | \omega_i) = a_i e^{-[b_i |X_l - m_i|]^{\beta_i}}$ ($i = 1, 2$) 的形状参数,其中 a_i, b_i 为正常量。 a_i, b_i, β_i 的求解步骤见文献^[12]。

最佳阈值的选择就是要使图像的平均分类性能 $J(T)$ 达到最小值。即^[11]:

$$T^* = \underset{T=0,1,\dots,L-1}{\operatorname{argmin}} J(T) \quad (3)$$

使得 $J(T)$ 达到最小值的 T 值即为干湿雪划分的最佳阈值。

3.3 改进的小波变换的冰盖冻融探测方法

通过观察和分析冰盖冻融时的亮温变化特点及广

义高斯模型的性质特征,提出了通过广义高斯模型自动确定干湿雪最优分类阈值的方法,即对亮温的长时间序列数据做直方图统计,通过自动阈值分割的方法得到干湿雪划分的最优阈值^[13],通过此最优阈值得到南极融化区域及融化开始、持续和结束时间分布图.改进的算法除了能克服双高斯模型拟合干湿雪分类的最优阈值出现的问题外,还能自动得到一个唯一的干湿雪的最优分类阈值,可操作性强,较好地实现了南极地区冰盖冻融的自动化监测.图1为改进的小波变换的南极冰盖冻融探测的简单流程图.

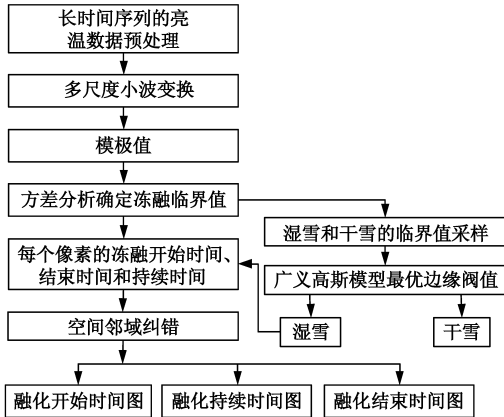


图1 改进的小波变换的南极冰盖冻融探测流程图

4 南极冰盖冻融探测结果与验证

图2为根据文献[1]选取南极的某些典型样本区后利用双高斯模型拟合得到干湿雪分类的最优阈值约为10.2.由广义高斯模型的自动阈值划分方法得到的干湿雪分类的最优阈值为10.4.

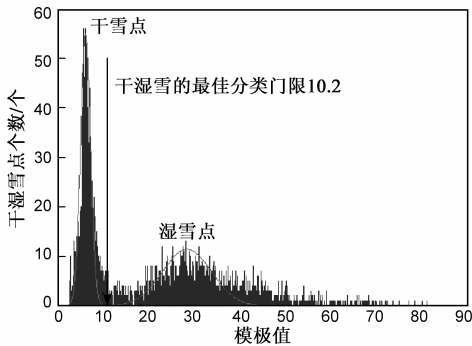


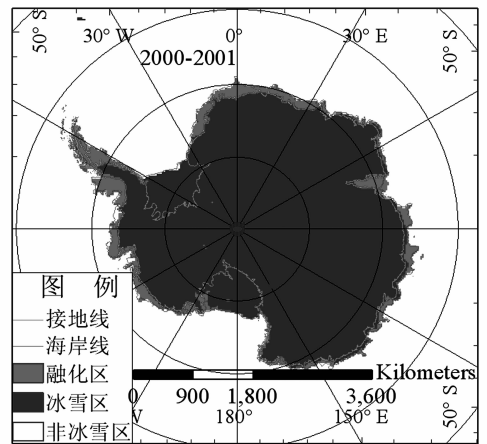
图2 双高斯模型拟合得到的最优阈值

图3为基于小波变换的2000年7月1日~2001年6月30日总的融化区域分布图.从图3可见:两个结果相差不多,但原小波变换模型的结果中,南极内陆地区出现了融化区域,根据南极地区冻融分布特征和南极地区的实际情况,在南极内陆地区出现融化区域是不可能的,可知原小波变换模型方法在南极冰盖冻融探测中存在一些问题.而改进的小波变换的算法所得的冻融结果

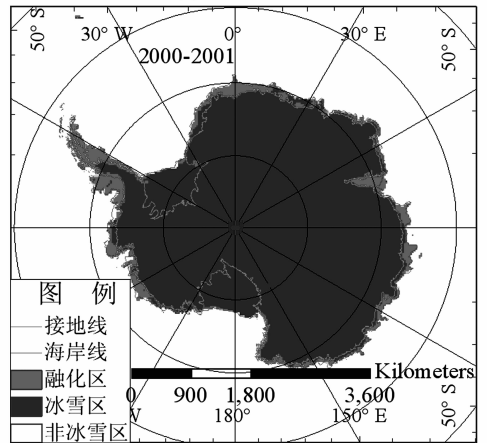
在南极内陆地区没有出现融化区域.通过以上比较可知:改进的小波变换模型方法相对原小波变换模型方法在冰盖冻融探测方面具有较高的精度.且广义高斯模型算法不依赖于初始值的估计和设定,自动完成最优阈值的分割过程,提高了阈值计算的效率,对于南极冰盖冻融监测的业务化运行系统实施的简单化和方便性方面提供了保障.

图4为改进后的小波变换模型的冰盖冻融探测算法得到的南极地区2000年7月1日~2001年6月30日的冰盖融化开始、结束和持续时间及地面验证站点的位置分布图.

本文利用10个站点的近地面气温记录来验证干湿雪的融化状况.图5和图6分别为干雪站点和湿雪站点2000年7月1日~2001年6月30日的气温变化图.



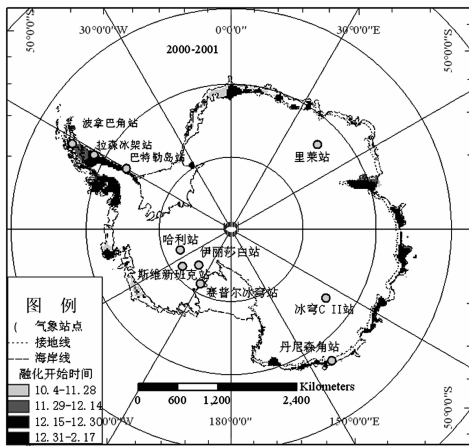
(a) 原小波变换



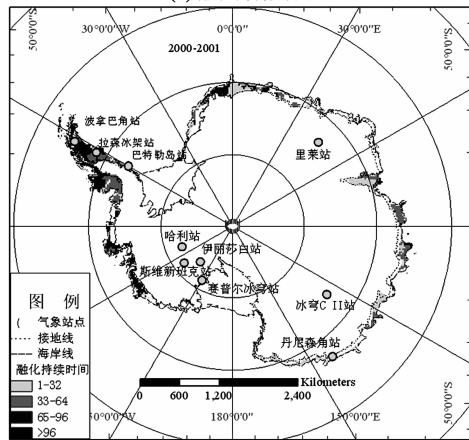
(b) 改进的小波变换

图3 基于小波变换的南极冰盖冻融探测结果

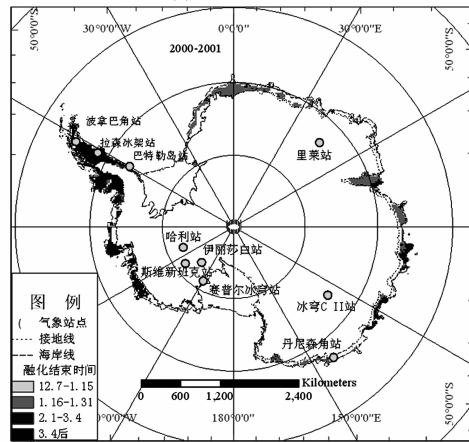
由图5可知,干雪站点的气温虽然随着季节呈起伏变化,但最高仅-5℃左右,未达到融化条件.图4的结果显示:所选干雪站点区域均未发生融化,与站点数据显示的结果一致.从图6可以看出,巴特勒岛站、拉森冰架站和丹尼森角站的气温变化趋势一致,它们的冬季气温较低,从11月份起,气温开始升高,12月到次年2月,



(a) 融化开始时间



(b) 融化持续时间



(c) 融化结束时间

图4 改进的小波变换的南极冰盖冻融探测结果

温度基本上都是在 0℃ 以上. 波拿巴角站的近地面气温相对较高, 11 月到次年 4 月期间温度都在 0℃ 以上. 当近地面气温高于 0℃ 时, 冰雪融化. 据此, 从巴特勒岛站点的平均气温曲线可知, 该地仅在 1 月中上旬的数天内达到 0℃, 即处于融化状态, 这一结果与图 4 所示的结果一致. 拉森冰架站与丹尼森角站的近地面气温在 12 月中旬开始达到 0℃, 2 月份开始降低到 0℃ 以下, 与该地区的冰雪融化结果一致. 此外, 波拿巴角站所在地区

的融化结果显示, 它在 11 月到次年 3 月底处于明显的融化状态, 与近地面气温在该期间处于 0℃ 的现象基本一致.

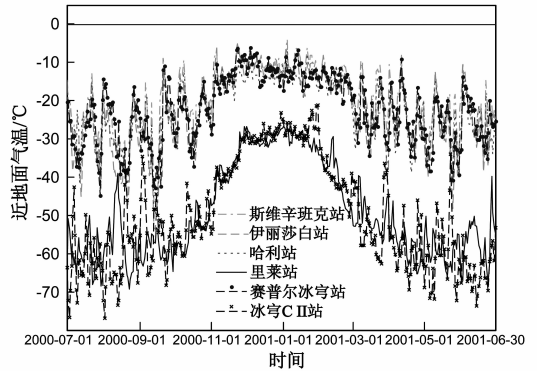


图5 南极部分干雪站点气温变化图

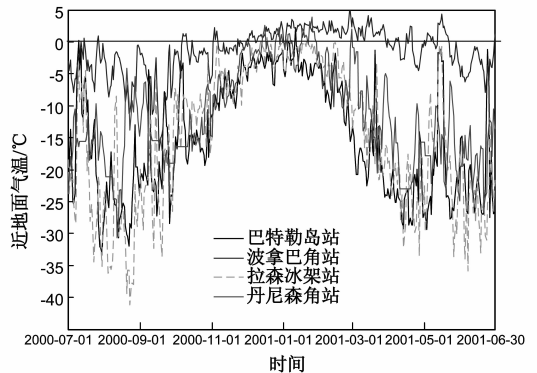


图6 南极部分湿雪站点近地面气温变化图

通过对典型干湿雪区域的地面验证可知:改进的小波变换模型算法对南极冰盖的融化探测结果符合实际情况,反映了南极冰盖冻融的时空分布.

5 结论

本文提出的改进的小波变换算法解决了原小波变换算法中通过双边高斯模型来拟合干湿雪分类的最优阈值的实用性和可操作性差的问题,实现了南极地区冰盖冻融的自动化监测.通过改进前后的冰盖冻融探测结果比较及自动气象站点的温度数据验证表明:改进的小波变换算法在冰盖冻融探测的实用性和可操作性方面有所提高,同时,改进的小波变换算法对南极冰盖的冻融探测是有效和可靠的,探测结果相对原算法而言具有较高的精度.而且此算法也可以应用到其它地区,为全球冰盖冻融探测提供了方法学的支持和补充.

参考文献

[1] Liu H, Wang L, Jezek K C. Wavelet-transform based edge detection approach to derivation of snowmelt onset, end and duration from satellite passive microwave measurements [J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26 (21): 4639 -

4660.

- [2] Liu H, Wang L, Jezek K C. Spatiotemporal variations of snowmelt in Antarctica derived from satellite scanning multi-channel microwave radiometer and special sensor microwave imager data (1978 – 2004) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111, F01003:1 – 20.
- [3] Wang L. Deriving spatially varying thresholds for real-time snowmelt detection from space-borne passive microwave observations [J]. *Remote Sensing Letters*, 2012, 3 (4):305 – 313.
- [4] Tedesco M, Abdalati W, Zwally H J. Persistent surface snowmelt over Antarctica (1987 – 2006) from 19.35 GHz brightness temperatures [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L18504:1 – 6.
- [5] Tedesco M. Assessment and development of snowmelt retrieval algorithms over Antarctica from K-band spaceborne brightness temperature (1979 – 2008) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113 (5):979 – 997.
- [6] Aschraft I S, Long D G. Comparison of methods for melt detection over Greenland using active and passive microwave measurements [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(12):2469 – 2488.
- [7] Takala M, Pulliainen J, Huttunen M, et al. Detecting the onset of snow-melt using SSM/I data and the self-organizing map [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29 (3):755 – 766.
- [8] Takala M, Pulliainen J, Metsamaki S J, et al. Detection of snowmelt using spaceborne microwave radiometer data in Eurasia from 1979 to 2007 [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(9):2996 – 3007.
- [9] 黄永辉, 吴季, 董晓龙. 综合孔径微波辐射计顺轨方向亮温反演算法的研究 [J]. *电子学报*, 2000, 28 (12):108 – 111.
Huang Yong-hui, Wu Ji, Dng Xiao-long. Brightness temperature reconstruction in the along-track direction of a synthet-

ic aperture microwave radiometer [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28 (12):108 – 111. (in Chinese)

- [10] 连可, 王厚军, 龙兵. 一种基于小波变换模极大值的估计 Lipschitz 指数新方法 [J]. *电子学报*, 2008, 36 (1):106 – 110.
Lian Ke, Wang Hou-jun, Long Bing. A novel method of measuring Lipschitz exponent based on wavelet transform modulus maxima [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(1):106 – 110. (in Chinese)
- [11] Kittler J, Illingworth J. Minimum error thresholding [J]. *Pattern Recognition*, 1986, 19 (1):41 – 47.
- [12] Sharifi K, Leongarcia A. Estimation of shape parameter for generalized Gaussian distributions in subband decompositions of video [J]. *IEEE Transactions on Circuit and Systems for Video Technology*, 1995, 5 (1):52 – 56.
- [13] Bazi Y, Bruzzone L, Melgani F. An unsupervised approach based on the generalized Gaussian model to automatic change detection in multitemporal SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(4):874 – 887.

作者简介



王星东 男, 1982 年生于陕西宝鸡, 2010 年秋进入中南大学攻读博士学位, 2011 年初进入中国科学院对地观测与数字地球科学中心从事主被动微波遥感的冰盖冻融探测方面的有关研究。
E-mail: zkywxd@163.com

熊章强 男, 1963 年生于湖南长沙, 中南大学地球科学与信息物理学院教授, 博士生导师, 主要从事地震勘探及数据处理和波场高分辨成像方面的有关研究。

E-mail: xzqxzq666@163.com