

引用格式:Wu Lili,Li Xiaofeng,Zhao Kai,*et al.* The Space-time Analysis and Validation of Snow Depth Inversion Algorithm of Passive Microwave in Northeast China[J]. Remote Sensing Technology and Application,2015,30(3):565-572. [武黎黎,李晓峰,赵凯,等. 被动微波雪深反演算法在东北地区的时空分析与验证[J]. 遥感技术与应用,2015,30(3):565-572.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2015.3.0565

被动微波雪深反演算法在东北地区的时空分析与验证

武黎黎^{1,2}, 李晓峰^{1,3}, 赵 凯^{1,3}, 郑兴明^{1,3}, 丁艳玲^{1,2}, 李洋洋^{1,2}, 任建华^{1,2}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院长春净月潭遥感试验站, 吉林 长春 130102)

摘要:Chang 算法及改进算法是被动微波遥感雪深反演算法中较简单的经验算法。为了评价改进的 Chang 算法在东北地区的适用性,对改进的 Chang 算法进行分析与验证。从空间上,选取了 84 个野外数据采样点和 48 个气象站点,对改进的 Chang 算法进行分析与验证。结果表明:森林下垫面改进的 Chang 算法会低估雪深 3.6 cm,而农田下垫面改进的 Chang 算法会高估雪深 1.5 cm。从时间序列上,选取五营、呼中、庆安和巴彦 4 个气象站点 2012 年 11 月 15 日~2013 年 2 月 28 日的时间序列雪深数据,对改进的 Chang 算法进行分析与验证。结果表明:森林下垫面改进的 Chang 算法会低估雪深,五营站点低估雪深 13.7 cm,呼中站点低估雪深 8.3 cm,农田下垫面改进的 Chang 算法会高估雪深,庆安站点高估雪深 3.4 cm,巴彦站点高估雪深 0.8 cm。无论从空间上还是时间序列上,验证结果都表明,农田下垫面时改进的 Chang 算法的精度比森林下垫面时要高。此外,站点雪深不变而改进的 Chang 算法反演的雪深却在增大,这可能是由于期间雪粒径不断增大的缘故。

关 键 词:雪深;遥感;被动微波;微波成像仪;东北地区

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2015)03-0565-08

1 引 言

冰冻圈在全球气候系统中扮演着重要角色,而积雪是其中最活跃、覆盖面积最广的要素^[1]。积雪以高反射率及低导热率的特性,对气候环境发生深刻影响,是气候环境的重要因素之一^[2]。地球陆地上有四分之三的淡水资源以冰雪形式存在,在中高纬度地区

积雪更是河流与地下水的主要补给来源之一^[3-4]。2000 年成立的气候与冰冻圈计划(CliC, Climate and Cryosphere)也将积雪研究作为核心内容之一^[5]。

遥感技术的发展为大范围的积雪探测提供了有效手段。目前,探测积雪的遥感波段主要集中在可见光、近红外和微波波段。可见光遥感和近红外遥感由于不能穿透积雪,只能反映积雪表层信息,主

收稿日期:2013-11-25;修订日期:2015-03-27

基金项目:国家 863 计划项目“遥感产品真实性检验关键技术及其试验验证”(2012AA12A305-5-2),国家自然科学基金项目“东北地区季节性积雪层中雪粒径的谱分布特征与微波(辐射、散射)特性研究”(41001201),国家自然科学基金项目“东北地区森林下雪深被动微波遥感反演的关键影响参数观测与研究”(41471289),吉林省科技发展计划项目“我国东北地区积雪与土壤湿度多源遥感数据产品的开发与应用”(20140101158JC),国家自然科学基金项目“被动微波遥感土壤水分反演精度与空间异质特征的相关性研究”(41301369)。

作者简介:武黎黎(1988—),女,山东菏泽人,博士研究生,主要从事积雪遥感研究。E-mail:wu.lili0330@163.com。

通讯作者:赵 凯(1962—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事微波遥感机理研究以及仪器研发。E-mail:zhaokai@neigae.ac.cn。

要用来探测积雪面积。而微波遥感能够穿透雪层,反映积雪的深层信息,可用于探测雪深和雪水当量等这些水文、气候研究中所需的重要的积雪参数。同时,被动微波遥感的时间分辨率很高,能够快速覆盖全球,已被广泛应用于全球和大陆尺度的积雪时空变化研究中。

随着搭载被动微波传感器的 Nimbus-7 卫星、美国国防部的极轨卫星计划 DMSP(Defense Meteorological Satellite Program)和 Aqua 等一系列卫星的升空,积雪被动微波遥感研究取得了快速发展^[6-10]。我国搭载微波成像仪(MWRI)的 FY3B 卫星也于 2010 年 11 月 5 日发射升空,MWRI 是继 AMSR-E 出现故障之后为数不多的适合积雪研究的被动微波传感器之一。针对不同的被动微波传感器,国内外学者发展了多种积雪的被动微波遥感模型和算法,如 MEMLS 模型^[11-12]、HUT 模型^[13]、DMRT 模型^[14-15]、Chang 算法^[16]、改进的 Chang 算法^[17]。Chang 算法及改进的 Chang 算法是在积雪数据产品中最常用的业务化算法,也是主流的经验雪深反演算法。它是利用雪层对 18.7 和 36.5 GHz 的微波辐射的衰减不同,通过这两个频率的亮温差与雪深建立线性关系而得到雪深参数的。针对 Chang 算法已开展了一些验证工作^[16,18-20],得出的主要结论是 Chang 算法在大多数情况下能够较好地反演雪深。但是 Chang 算法也会出现低估雪深的情况,这主要是由于 Chang 算法在雪深大于 1 m 时亮温差出现饱和现象以及森林的影响,另外雪粒径的变化也会影响反演结果。例如,Foster 等^[21]的研究表明,在北方森林区域,Chang 算法会低估雪深 50%。改进的 Chang 算法是在 Chang 算法的基础上加以修正,当雪粒径为 0.4 mm 时系数由 1.59 修正为 0.78。本文以东北地区为研究区,对改进的 Chang 算法反演的雪深在时间和空间上进行分析与验证,确定算法的误差来源,为算法的进一步改进奠定基础。

2 研究区与数据

2.1 研究区

我国积雪区主要包括东北地区、北疆和天山地区及青藏高原地区。东北地区是我国典型的季节性积雪区之一,包括黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古自治区东部,自南向北跨越暖温带、中温带与寒温带,属于温带季风气候。自东向西,降水量由 1 000 mm 降至 300 mm 以下,由湿润区、半湿润区过渡到半干旱区。

2.2 数 据

本文采用的数据包括野外实测雪深数据和气象站点雪深数据、FY3B 卫星微波成像仪(MWRI)的 L1 级亮温数据以及东北地区 1 km 土地覆盖分类制图数据。

2.2.1 野外实测雪深数据和气象站点雪深数据

东北地区在 1 月份有稳定的积雪,因此选择 1 月进行雪参数(雪深、雪粒径、雪温度)测量。2012 年 1 月 4~14 日在长白山和小兴安岭及以西选取 84 个采样点进行积雪参数(雪深、雪粒径和雪温度)的测量。另外,选取了 2012 年 1 月 10 日 48 个气象站点的雪深数据。2012 年 1 月野外数据采样点及气象站点如图 1 所示。在进行时间序列分析时,选取了五营、呼中、庆安和巴彦 4 个气象站点 2012 年 11 月 15 日~2013 年 2 月 28 日的雪深数据。

2.2.2 卫星数据

FY3B 卫星于 2010 年 11 月 5 日发射成功,它是 中国第二代极轨气象卫星,以三轴稳定方式对地观测,星上携带了 12 种观测仪器,能实现全球、全天候、多光谱、三维、定量对地观测。其携带的微波成像仪(MWRI)有 5 个频段,分别为:10.65、18.7、23.8、36.5 以及 89 GHz,其中每个频段都有水平极化和垂直极化两种极化方式。MWRI 的具体参数见表 1。图 1 的底图显示了 2012 年 1 月 10 日的 FY3B 微波成像仪(MWRI)的 18.7 GHz 水平极化亮温数据。

表 1 FY3B 微波成像仪(MWRI)的性能参数
Table 1 The property parameter of Microwave Radiation Imager (MWRI) on FY3B

频率/GHz	10.65	18.7	23.8	36.5	89
极化	V,H	V,H	V,H	V,H	V,H
主波束效率	≥90%				
地面分辨率≤(km×km)	51×85	30×50	27×45	18×30	9×15
带宽/MHz	180	200	400	900	2×2 300
扫描方式	圆锥扫描				
幅宽/km/	1400				
扫描周期/s	1.7±0.1				
天线视角/°	45±0.1				

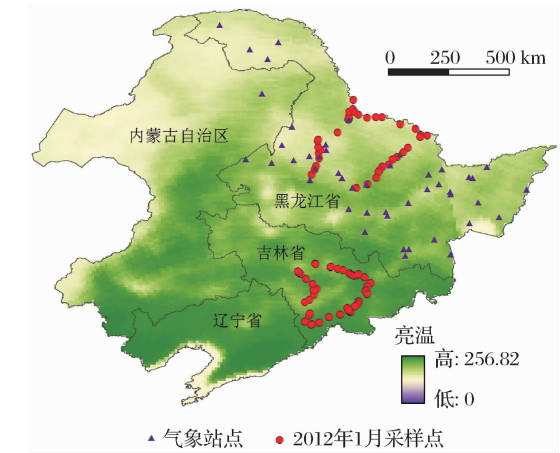


图 1 2012 年 1 月野外数据采样点和气象站点
Fig. 1 Field sampling points in January 2012 and meteorological stations

本研究使用 FY3B 卫星微波成像仪(MWRI)的 L1 级亮温数据,频段和极化方式为 18.7 和 36.5 GHz 水平极化亮温数据。考虑到仅仅使用升轨或者降轨数据,不能覆盖有些采样点及气象站点,以及在一天内雪深变化不大,因此本文中升轨和降轨数据都有用到。把 18.7 和 36.5 GHz 水平极化亮温采样为 10 km 的分辨率,投影方式采用经纬度投影,利用这两个波段数据和改进的 Chang 算法进行雪深的反演。

2.2.3 东北地区 1 km 土地覆盖分类制图数据

中国 1 km 土地覆盖分类制图^[22]按照 IGBP 土地覆盖分类系统将土地覆盖分为 17 类,其中 12 为农田,另外本研究中把 1~7 类作为森林。从中国 1 km 土地覆盖分类图中切割出东北地区,得到的东北地区 1 km 土地覆盖分类图如图 2 所示。由东北地区 1 km 土地覆盖分类数据计算得到分辨率为

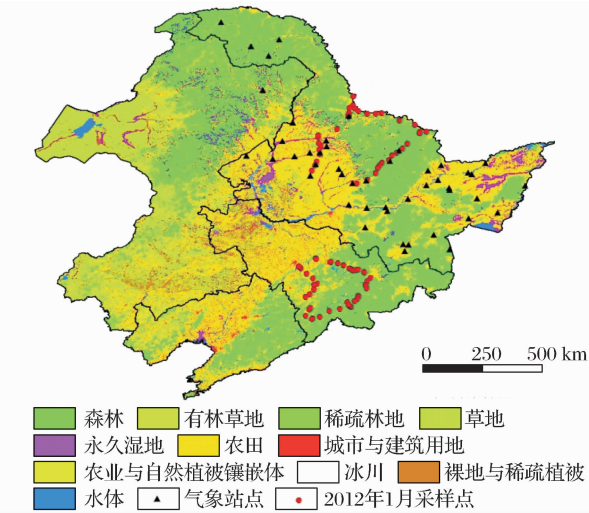


图 2 东北地区 1 km 土地覆盖分类图
Fig. 2 1 km land cover classification of Northeast China

10 km 的各种地物类型所占比例,具体计算方法为 10 km 内地物类型所占的像元数除以总像元数。在进行时间序列分析时,选取了森林覆盖度较高(>90%)的五营、呼中,以及农田比例很高(为 100%)的庆安和巴彦 4 个气象站点 2012 年 11 月 15 日~2013 年 2 月 28 日的数据进行了对比分析。

3 研究方法

3.1 改进的 Chang 算法

Chang 算法是由华人科学家张铁钧(A. T. C. Chang)提出的^[16],该算法是基于 Nimbus-7 卫星上搭载的 SMMR 数据回归得到的经验算法。

覆盖积雪的地表的微波辐射主要有两个来源,一是积雪部分的辐射,二是下垫面部分的辐射。积雪部分的辐射很少,而下垫面部分的辐射是辐射计接收的主要来源。由于积雪的体散射作用,使得积雪对下垫面辐射有衰减,随着积雪越深,这种衰减作用越强,到达辐射计的亮温就越小。而对于不同的微波频率,积雪的衰减不同,37 GHz 时积雪的衰减作用要强于 18 GHz。研究表明,18 和 37 GHz 的水平极化亮温差和雪深成正比,这就是 Chang 算法的理论依据,回归公式如下:

$$SD=1.59\times(T18H-T37H) \tag{1}$$

其中:SD 代表雪深,T18H 和 T37H 分别代表 18 和 37 GHz 水平极化亮温。Chang 算法公式中之所以要选水平极化的亮温,是因为水平极化对雪深比垂直极化更为敏感。

Chang 算法的基本假设是雪粒径为 0.3 mm,雪密度为 0.3 g/cm³。当雪深大于 1 m 时,18 和 37 GHz 的亮温差饱和,因此式(1)的适用范围是雪深小于 1 m 的时候。Chang 算法在均质像元或者均质区域反演的精度较高,而对于非均质像元或者非均质区域,精度却较低。

Foster 等^[17]对 Chang 算法的系数进行了修正,当雪粒径为 0.4 mm 时,系数修正为 0.78. 修正后的算法如式(2)所示。式(2)被称为改进的 Chang 算法。根据 2012 年 1 月和 2013 年 1 月在东北地区的野外采样^[23]可知,当下垫面是森林时,积雪的粒径大致可以分为 3 层,第一层的粒径大致为 0.3~0.5 mm,第二层的粒径大致为 1 mm,第三层的粒径大致为 1~2 mm;当下点面是农田时,由于深霜层的影响,最下面一层的粒径比农田时更大一些。Chang 算法假设雪粒径为 0.3 mm,对于东北地区,雪粒径显然比 0.3 mm 大一些。因此,本文选用改进的 Chang 算法进行验证。

$$SD=0.78\times(T18H-T37H) \tag{2}$$

该雪深反演算法是针对 SMMR 和 SSM/I 发展的,由于 MWRI 具有 18.7 和 36.5 GHz 两个频率,和 SMMR 的 18.37 GHz 以及 SSM/I 的 19.37 GHz 相近,因此,本文将基于 FY3B 微波成像仪(MWRI)的 18.7 和 36.5 GHz 水平极化亮温利用改进的 Chang 算法进行雪深的反演,并与实测的雪深数据进行对比分析。

3.2 时空分析方法

本文利用 2012 年 1 月 4~14 日的 84 个野外数据采样点和 2012 年 1 月 10 日 48 个气象站点的雪深数据对 Chang 算法进行空间上的分析与验证,重点针对研究区内的土地利用类型,分析农田下垫面和森林下垫面时改进的 Chang 算法的反演精度。在空间分析的基础上,针对典型的几个站点进行时间序列分析,理解和确认误差来源,从而为进一步提高算法精度提供依据。

4 分析与结果

4.1 空间分析

为保证采样时间与亮温时间一致,提取采样点处对应时间的 FY3B-MWRI 的 L1 级 18.7 和 36.5 GHz 水平极化亮温,例如,采样时间为 2012 年 1 月 4 日,则用 2012 年 1 月 4 日亮温进行雪深反演。气象站点的雪深数据选取 2012 年 1 月 10 日,改进的 Chang 算法反演雪深则用 2012 年 1 月 10 日的亮温数据。野外采样点和气象站点的实测雪深与改进的 Chang 算法反演雪深的对比如图 3 所示。

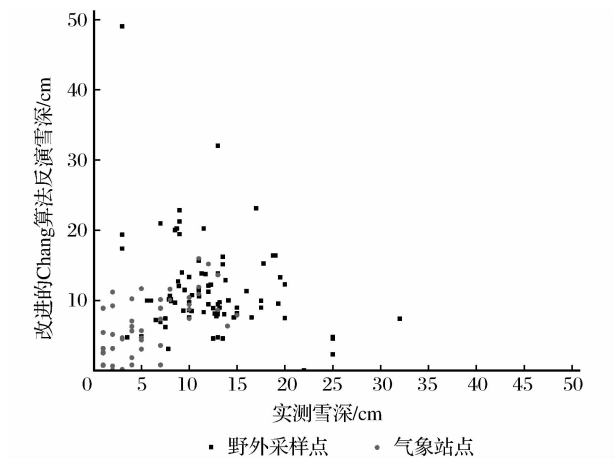


图 3 野外采样点和气象站点的实测雪深与改进的 Chang 算法反演雪深对比

Fig. 3 The comparison chart of measured snow depth and snow depth of improved Chang algorithm inversion for Field sampling points and meteorological stations

由图 3 可知,改进的 Chang 算法反演雪深与实测雪深存在一定的差距,有些点高估雪深,有些点会低估雪深。森林对于雪深反演精度有很大影响,低估雪深还是高估雪深与下垫面关系很大。为了进一步分析反演精度,将改进的 Chang 算法在农田下垫面和森林下垫面情况下反演的雪深分别提取出来进行比较。由东北地区 1 km 土地覆盖分类计算得到野外采样点和气象站点所在的 10 km 像元的农田和森林比例,若森林比例大于 60%,森林占主导,则认为是森林下垫面;若农田比例大于 60%,农田占主导,则认为是农田下垫面。并把农田下垫面和森林下垫面的实测雪深与改进的 Chang 算法反演雪深进行对比分析,结果如图 4 和 5 所示。

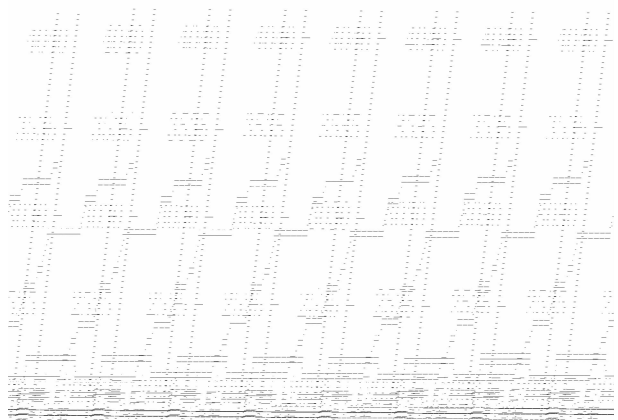


图 4 农田下垫面的实测雪深与改进的 Chang 算法反演雪深对比

Fig. 4 The comparison chart of measured snow depth and snow depth of improved Chang algorithm inversion when the underlying surface is farmland

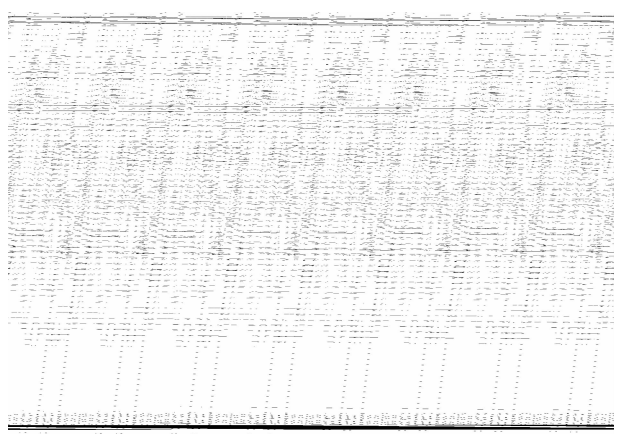


图 5 森林下垫面的实测雪深与改进的 Chang 算法反演雪深对比

Fig. 5 The comparison chart of measured snow depth and snow depth of improved Chang algorithm inversion when the underlying surface is forest

由图 4 和图 5 可知,农田下垫面时改进的 Chang 算法总体上和实测雪深吻合得较好,而森林下垫面时改进的 Chang 算法在大多数点低估了雪深。为了更精确地分析农田下垫面、森林下垫面以及整体情况下改进的 Chang 算法反演的精度,分别计算了 3 种情况下的偏差(Bias)和平均误差(Mean Error)。偏差和平均误差的计算公式如式(3)、(4)所示。其中 $d1$ 代表改进的 Chang 算法反演雪深, $d0$ 代表实测雪深, n 为点的个数。农田下垫面、森林下垫面以及整体改进的 Chang 算法的精度如表 2 所示。

$$\text{Bias} = \sum_{i=1}^n (d1 - d0) / n$$

(3)

$$\text{Mean Error} = \sum_{i=1}^n (|d1 - d0|) / n$$

(4)

表 2 农田下垫面、森林下垫面以及整体情况下改进的 Chang 算法的精度

Table 2 The accuracy of the improved Chang algorithm when the underlying surface is farmland and forest and the accuracy of the improved Chang algorithm for all points

	偏差/cm	平均误差/cm
农田下垫面	1.5	4.9
森林下垫面	-3.6	7.5
整体	-0.2	5.0

由表 2 可以看出,农田下垫面比森林下垫面时的偏差绝对值和平均误差要小,即农田下垫面比森林下垫面时算法的精度要高。并且森林下垫面时,偏差为-3.6,表示森林下垫面时算法会低估雪深 3.6 cm。而农田下垫面时,偏差为 1.5,表示农田下垫面时算法会高估雪深 1.5 cm。整体情况下的偏差介于农田下垫面和森林下垫面之间,是由于农田下垫面高估雪深及森林下垫面低估雪深造成的。整体情况下改进的 Chang 算法低估雪深 0.2 cm,而农田下垫面时高估 1.5 cm,森林下垫面时低估 3.6 cm,因此在进行算法的精度评价时,不能仅仅从整体上进行评价,整体上结果好可能是由于不同下垫面高估雪深和低估雪深中和的结果。

4.2 时间序列分析

从空间分析的结果可知,森林下垫面改进的 Chang 算法会低估雪深,而农田下垫面改进的 Chang 算法会高估雪深。因此,选取典型的森林下垫面的两个气象站点和农田下垫面的两个气象站点进行时间序列分析,以考察森林区和农田区改进的

Chang 算法在时间尺度上的精度,确定误差来源。从 1 km 土地覆盖分类图提取每个被动微波像元中(10 km×10 km)森林和农田所占的比例,选取代表较纯的森林下垫面(10 km×10 km 像元中森林比例>90%)的两个气象站点为五营和呼中,典型的农田下垫面的两个气象站点为庆安和巴彦(10 km×10 km 像元中农田比例为 100%)。时间序列为 2012 年 11 月 15 日~2013 年 2 月 28 日,在此期间 4 个站点均有积雪,而且查询气温可知积雪均为干雪。五营、呼中、庆安和巴彦的站点雪深与改进的 Chang 算法反演雪深的对比如图 6 所示。

由图 6(a)和(b)可以看出,森林下垫面的五营和呼中站点,改进的 Chang 算法会低估雪深。为了更精确地描述改进的 Chang 算法反演雪深的精度,计算了 4 个站点的均方根误差、偏差和平均误差,偏差和平均误差的计算如式(3)、(4)所示,均方根误差的计算如式(5)所示。其中 $d1$ 代表改进的 Chang 算法反演雪深, $d0$ 代表实测雪深, n 为时间点的个数。五营、呼中、庆安和巴彦的均方根误差、偏差和平均误差的值如表 3 所示。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (d1 - d0)^2 / n}$$

(5)

由表 3 可知,五营和呼中的均方根误差和平均误差要大于庆安和巴彦的,即五营和呼中站点的改进的 Chang 算法反演精度低于庆安和巴彦,也就是说森林下垫面改进的 Chang 算法反演精度不如农田下垫面。五营和呼中的偏差均为负值,表明森林下垫面时改进的 Chang 算法会低估雪深,五营低估雪深 13.7 cm,呼中低估雪深 8.3 cm。改进的 Chang 算法在森林下垫面会出现低估雪深的现象,是由于在 37 GHz 时植被是一个强的吸收体,主导着微波上行辐射。而庆安和巴彦的偏差为正值,表明农田下垫面时改进的 Chang 算法会高估雪深,庆安高估雪深 3.4 cm,巴彦高估雪深 0.8 cm。由图 6(c)和(d)可知,当雪深不变时,而改进的 Chang 算法反演的雪深却在增大,这可能是由于在这期间雪粒径不断增大的缘故。由图 6(a)和(b)可知,当雪深不变时,改进的 Chang 算法反演的雪深也会有增大的趋势,但是反演雪深却没有农田下垫面时增大得快,造成这种现象的原因可能是在此期间雪粒径也在增大,但是雪粒径在森林下垫面时比农田下垫面时变化慢。

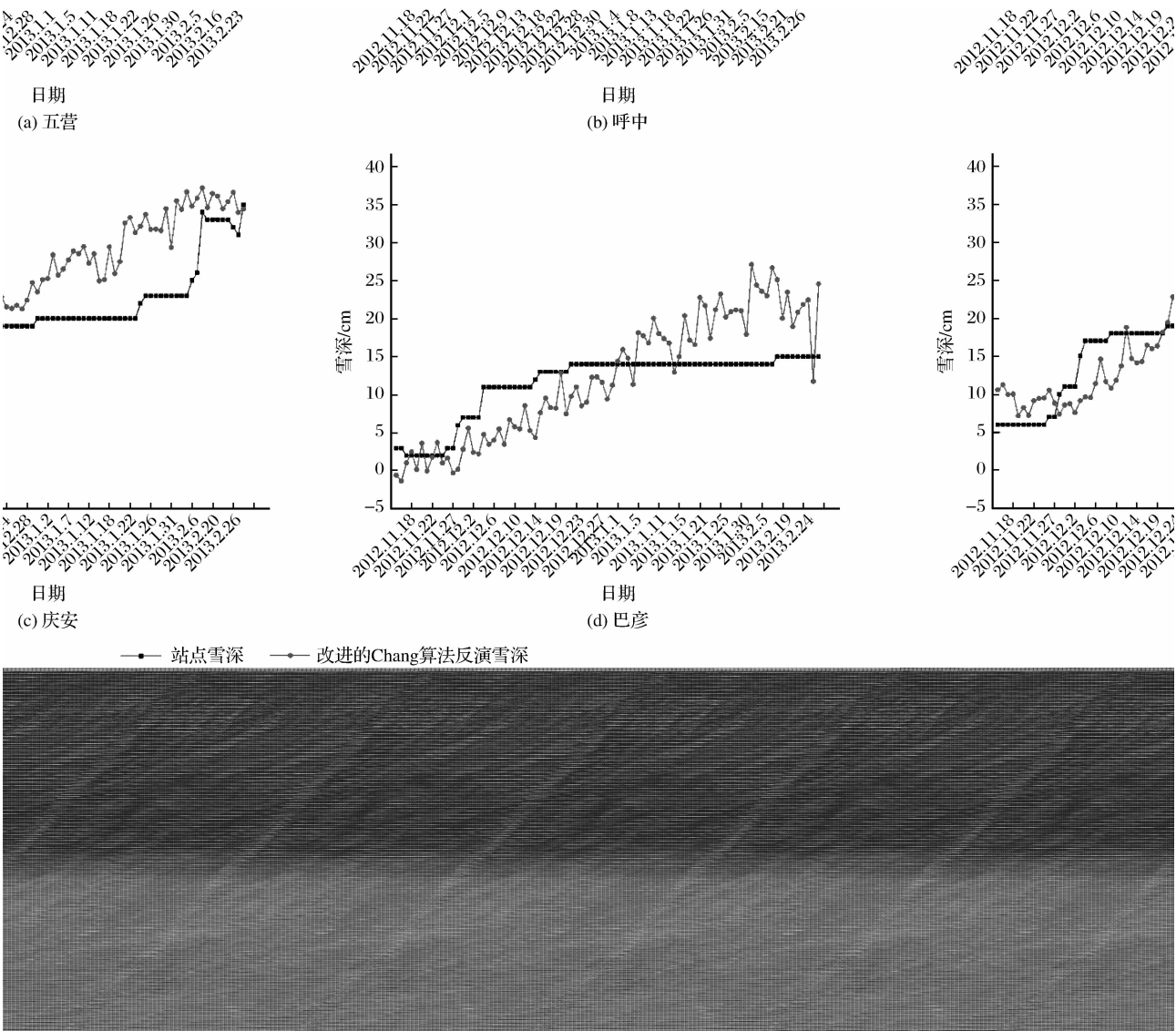


图 6 五营、呼中、庆安和巴彦的站点雪深与反演雪深对比

Fig. 6 The comparison chart of snow depth of meteorological stations and snow depth of improved Chang algorithm inversion for Wuying, Huzhong, Qing'an and Bayan

表 3 五营、呼中、庆安和巴彦的均方根误差、偏差和平均误差值

Table 3 RMSE, Bias and Mean Error for Wuying, Huzhong, Qing'an and Bayan

	均方根误差/cm	偏差/cm	平均误差/cm
五营	14.8	−13.7	13.7
呼中	8.7	−8.3	8.3
庆安	6.3	3.4	5.4
巴彦	5.5	0.8	4.7

5 结 语

对雪深反演算法不同条件下精度的分析和验证有利于确定误差来源,从而改进和发展积雪反演模

型^[24]。但以往的大多数研究仅仅从空间或者时间的角度对算法进行验证^[23-26],而兼顾时间和空间两方面对算法进行验证的较少。本文对被动微波雪深反演算法进行了较详细的时空分析与验证。从空间上验证结果表明,农田下垫面比森林下垫面时改进的 Chang 算法的精度要高,并且森林下垫面改进的 Chang 算法会低估雪深,而农田下垫面改进的 Chang 算法会高估雪深。从时间序列上验证结果表明,森林下垫面时改进的 Chang 算法反演精度不如农田下垫面,与空间分析的结果类似,整体上森林下垫面改进的 Chang 算法会低估雪深,农田下垫面改进的 Chang 算法会高估雪深,不同的阶段算法的反演精度表现不同,在冬季的前一阶段,农田下垫面算

法倾向于低估雪深,森林区会低估的更多,而后一阶段农田下垫面高估雪深,森林下垫面和前一阶段相比低估较少。

无论从空间上还是时间序列上,改进的 Chang 算法的验证结果都表明,森林下垫面时改进的 Chang 算法会低估雪深,这是因为在 37 GHz 时植被是一个强的吸收体,主导着微波上行辐射,使得森林下的积雪信息一部分被掩盖。在时间序列分析时,当雪深不变时,改进的 Chang 算法反演的雪深却在增大,这可能是由于在这期间雪粒径不断增大以及深霜层发育的结果,粒径的增大会增加雪层对于 36.5 GHz 微波的散射衰减,使 18.7 和 36.5 GHz 的亮温差增大,从而使得改进的 Chang 算法反演的雪深增大。

总之,雪深的被动微波反演受下垫面类型、森林辐射、雪粒径和深霜层等多种因素影响,通过时空精度分析进一步确定其影响因素和不确定性来源,并有针对性地改进和发展业务化算法将是今后的研究重点。

致谢:野外实验得到中国科学院寒区旱区环境与工程研究所戴礼云博士的大力支持,在此表示感谢!

参考文献 (References):

- [1] Li Xin, Che Tao. A Review on Passive Microwave Remote Sensing of Snow Cover[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 487-496. [李新, 车涛. 积雪被动微波遥感研究进展[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 487-496.]
- [2] Cao Meisheng, Li Peiji, Robinson D A, *et al.* Evaluation and Primary Application of Microwave Remote Sensing SMMR Derived Snow Cover in Western China[J]. Chinese Journal of Remote Sensing of Environment, 1993, 8(3): 260-269. [曹梅盛, 李培基, Robinson D A, 等. 中国西部积雪 SMMR 微波遥感的评价与初步应用[J]. 环境遥感, 1993, 8(3): 260-269.]
- [3] Robinson D, Dewey K, Heim R. Global Snow Cover Monitoring: An Update[J]. Bulletin of American Meteorological Society, 1993, 74(9): 1689-1696.
- [4] Che T, Li X, Jin R, *et al.* Snow Depth Derived from Passive Microwave Remote-sensing Data in China[J]. Annals of Glaciology, 2008, 49: 145-154.
- [5] Wu Yang, Zhang Jiahua, Xu Haiming, *et al.* Advances in Study of Snow-cover from Remote Sensing Data[J]. Meteorological Monthly, 2007, 33(6): 3-10. [吴杨, 张佳华, 徐海明, 等. 卫星反演积雪信息的研究进展[J]. 气象, 2007, 33(6): 3-10.]
- [6] Kunzi K F, Patil S, Rott H. Snow Cover Parameters Retrieved from NIMBUS-7 Scanning Multichannel Microwave Radiometer(SMMR) Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1982, 20(4): 452-467.
- [7] Chang A T C, Foster J L, Hall D K, *et al.* Snow Water Equivalent Estimation by Microwave Radiometry[J]. Cold Regions Science and Technology, 1982, 5(3): 259-267.
- [8] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Volume II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory[M]. Norwood, MA: Artech House, 1982: 457-1064.
- [9] Cao Meisheng, Li Xin, Chen Xianzhang, *et al.* Remote Sensing on Cryosphere[M]. Beijing: Science Press, 2006: 1-266. [曹梅盛, 李新, 陈贤章, 等. 冰冻圈遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1-266.]
- [10] Dai L Y, Che T, Wang J, *et al.* Snow Depth and Snow Water Equivalent Estimation from AMSR-E Data based on a Priori Snow Characteristics in Xinjiang, China[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 127(1): 14-29.
- [11] Wiesmann A, Matzler C. Microwave Emission Model of Layered Snowpacks[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 70(3): 307-316.
- [12] Matzler C, Wiesmann A. Extension of the Microwave Emission Model of Layered Snowpacks to Coarse-grained Snow[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 70(3): 317-325.
- [13] Pulliainen J T, Grandell J, Hallikainen M T. HUT Snow Emission Model and Its Applicability to Snow Water Equivalent Retrieval[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(3): 1378-1390.
- [14] Tsang L, Chen C T, Chang A T C, *et al.* Dense Media Radiative Transfer Theory based on Quasicrystalline Approximation with Applications to Passive Microwave Remote Sensing of Snow[J]. Radio Science, 2000, 35(3): 731-749.
- [15] Jin Y Q. Radiative Transfer of Snowpack/Vegetation Canopy at the SSM/I Channels and Satellite Data Analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 61: 55-63.
- [16] Chang A T C, Foster J L, Hall D K. Nimbus-7 SMMR Derived Global Snow Cover Parameters[J]. Annals of Glaciology, 1987, 9: 39-44.
- [17] Foster J L, Chang A T C, Hall D K. Comparison of Snow Mass Estimates from Prototype Passive Microwave Snow Algorithm, a Revised Algorithm and a Snow Depth Climatology[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 62(2): 132-142.
- [18] Robinson D A, Dewey K F, Heim R R. Global Snow Cover Monitoring-An Update[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1993, 74(9): 1689-1696.
- [19] Tait A, Armstrong R. Evaluation of SMMR Satellite-derived Snow Depth using Ground-based Measurements[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(4): 657-665.
- [20] Armstrong R L, Brodzik M J. Hemispheric-scale Comparison and Evaluation of Passive-microwave Snow Algorithms[J]. Annals of Glaciology, 2002, 34: 38-44.
- [21] Foster J, Liston G, Koster R, *et al.* Snow Cover and Snow Mass Intercomparisons of General Circulation Models and Remotely Sensed Datasets[J]. Journal of Climate, 1996, 9(2): 409-426.
- [22] Ran Youhua, Li Xin, Lu Ling. China Land Cover Classification

- at 1 km Spatial Resolution based on a Multi-source Data Fusion Approach[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(2): 192-203. [冉有华, 李新, 卢玲. 基于多源数据融合方法的中国 1 km 土地覆盖分类制图[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(2): 192-203.]
- [23] Wu Lili, Li Xiaofeng, Zhao Kai, *et al.* Validation and Analysis of Snow Depth Inversion Algorithm in Northeast Typical Forest based on the FY3B-MWRI Data[J]. *Journal of Earth Information Science*, 2014, 16(2): 320-327. [武黎黎, 李晓峰, 赵凯, 等. 东北典型林区雪深反演算法的验证与分析[J]. *地球信息科学学报*, 2014, 16(2): 320-327.]
- [24] Che Tao. Impact on Passive Microwave Remote Sensing of Snow form Heterogeneities of Snow Properties[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(1): 27-33. [车涛. 积雪属性非均匀性对被动微波遥感积雪的影响[J]. *遥感技术与应用*, 2013, 28(1): 27-33.]
- [25] Derksen C, Walker A, Goodison B. A Comparison of 18 Winter Seasons of In-situ and Passive Microwave-derived Snow Water Equivalent Estimates in Western Canada[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88(3): 271-282.
- [26] Langlois A, Scharien R, Geldsetzer T, *et al.* Estimation of Snow Water Equivalent over First-year Sea Ice Using AMSR-E and Surface Observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(9): 3656-3667.
- [27] Tedesco M, Narvekar P S. Assessment of the NASA AMSR-E SWE Product[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2010, 3(1): 141-159.

The Space-time Analysis and Validation of Snow Depth Inversion Algorithm of Passive Microwave in Northeast China

Wu Lili^{1,2}, Li Xiaofeng^{1,3}, Zhao Kai^{1,3}, Zheng Xingming^{1,3},
Ding Yanling^{1,2}, Li Yangyang^{1,2}, Ren Jianhua^{1,2}

(1. *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China;*

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Changchun Jingyuetan Remote Sensing Test Site of Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

Abstract: Chang algorithm and improved Chang algorithm are the simple empirical algorithms of snow depth inversion algorithms of passive microwave remote sensing. In order to evaluate the applicability of the improved Chang algorithm in Northeast China, this paper analyzed and validated improved Chang algorithm. In spatial analysis, this study selected 84 field sampling points and 48 meteorological stations to analyze and validate the improved Chang algorithm. The results showed that when the underlying surface is forest improved Chang algorithm underestimated the snow depth of 3.6 cm, however when the underlying surface is farmland improved Chang algorithm overestimated the snow depth of 1.5 cm. In the time series analysis, this study selected snow depth data of four meteorological stations from 15 November 2012 to 28 February 2013 to analyze and validate the improved Chang algorithm, and four meteorological stations are Wuying, Huzhong, Qingan and Bayan respectively. The results showed that when the underlying surface was forest improved Chang algorithm underestimated the snow depth. It underestimated the snow depth of 13.7 cm for Wuying and 8.3 cm for Huzhong. However when the underlying surface was farmland improved Chang algorithm overestimated the snow depth. It overestimated the snow depth of 3.4 cm for Qingan and 0.8 cm for Bayan. The results also showed that when the underlying surface is farmland the accuracy of the improved Chang algorithm is better than that when the underlying surface is forest in spatial analysis and in the time series analysis. Moreover, the snow depth of improved Chang algorithm inversion was increasing and the depth of meteorological stations was constant. The possible cause was that snow grain size was increasing.

Key words: Snow depth; Remote sensing; Passive microwave; Microwave radiation imager; Northeast China