

积雪季森林冠层微波透过率半经验模型

杨建卫¹, 蒋玲梅¹, 武胜利^{2,3}, 栾英宏⁴, 潘金梅⁵, 施建成⁵

1. 遥感科学国家重点实验室 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875;

2. 国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心), 北京 100081;

3. 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081;

4. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109;

5. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

摘要: 星载被动微波遥感是获取宏观尺度雪深时空分布的重要手段。森林冠层不仅衰减了来自地表的微波辐射, 同时自身也是一个热辐射源, 因此森林冠层增加了被动微波遥感反演雪深的不确定性。本研究基于植被辐射传输 τ - ω 模型 (τ - ω) 提出了相邻像元 (森林和非森林) 的冠层微波透过率提取方法, 探索冠层微波透过率模型在卫星尺度的应用。该方法假设相邻的森林和非森林像元存在相同的积雪和环境参数, 通过联立相邻像元的辐射传输方程从理论上推算冠层微波透过率, 进而借助森林生物量建立森林透过率的半经验估算模型。通过对比微波辐射模型模拟亮温和 AMSR2 卫星观测亮温, 发现未经过森林辐射校正的亮温 (18.7 GHz 和 36.5 GHz) 往往存在低估现象, 而经过森林辐射校正后的模拟亮温更接近于卫星观测; 通过留一法 (Leave-One-Out Cross Validation) 对发展的透过率半经验模型验证, 发现反演的透过率与参考值相关性高于 0.7, 在 18.7 GHz 和 36.5 GHz 频段的均方根误差 RMSE 分别为 0.0589 和 0.0787; 通过分析高低频亮温差 ($Tb_{18.7V} - Tb_{36.5V}$) 与雪深的关系, 发现相关系数由森林辐射校正前的 0.26 提高到校正后的 0.46; 最后利用传统的经验性雪深反演算法对森林辐射校正效果进行测试, 发现雪深反演误差 (unRMSE) 由原来的 8.9 cm 降低到 7.8 cm, 相关系数由 0.32 提高到 0.49。本研究发展的冠层微波透过率半经验模型可以实现卫星遥感尺度的应用, 为提高林区的雪深反演精度提供了参考和支撑。

关键词: 被动微波遥感, 森林冠层, 相邻像元法, 微波透过率, 雪深

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 杨建卫, 蒋玲梅, 武胜利, 栾英宏, 潘金梅, 施建成. 2024. 积雪季森林冠层微波透过率半经验模型. 遥感学报, 28(4): 981-994

Yang J W, Jiang L M, Wu S L, Luan Y H, Pan J M and Shi J C. 2024. A semi-empirical microwave transmissivity model for forest canopies during the snow season. National Remote Sensing Bulletin, 28(4): 981-994 [DOI: 10.11834/jrs.20221748]

1 引言

雪深是地球系统研究中的关键参量之一, 掌握雪深的时空分布对于气候气象研究、水文水资源管理、全球水循环和能量循环具有重要的意义 (施建成等, 2016; 车涛等, 2020; 蒋玲梅等, 2020)。星载被动微波遥感是获取宏观尺度雪深时空分布的重要手段, 但是基于被动微波遥感的雪深反演算法仍然面临一系列挑战。例如森林冠层

衰减了来自林下的积雪微波辐射, 同时自身又会发射一部分热辐射进入卫星传感器, 因此森林冠层的存在增加了雪深反演的不确定性 (Che 等, 2016; Li 等, 2019; Wang 等, 2021)。

全球森林面积 39.99 亿 hm^2 , 覆盖率 30.6% (截至 2015 年, <http://www.fao.org/home/en> [2021-11-20])。中国是世界第五大森林资源拥有国家, 特别是在中国东北稳定积雪区覆盖大面积的森林。为了提高林区的雪深反演精度, 在经验性雪深反演算法

收稿日期: 2021-11-20; 预印本: 2022-03-22

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42090014, 42201346); 中央高校基本科研业务费专项资金 (编号: 2021NTST02); 中国航天科技集团有限公司第八研究院产学研合作基金资助项目 (编号: SAST2020-082); 风云卫星应用先行计划 (2022) (编号: FY-APP-2022.0305)

第一作者简介: 杨建卫, 研究方向为积雪微波遥感。E-mail: yangjw@bnu.edu.cn

通信作者简介: 蒋玲梅, 研究方向为微波遥感。E-mail: jiang@bnu.edu.cn

中通常引入森林覆盖度来校正反演值 (Foster 等, 1997; Kelly, 2009; Derksen 等, 2010; Jiang 等, 2014), 但是通过验证发现该类算法在森林区的相对误差仍然高达 45%—180% (武黎黎 等, 2015; Gu 等, 2016; Yang 等, 2019), 主要原因是森林结构复杂, 在全球尺度呈现很强的空间差异, 因此简单的通过覆盖度参数难以实现森林辐射校正, 从而限制了算法的普适性和精度。

冠层微波透过率模型为植被辐射传输模型提供输入参数, 最终实现森林辐射校正。Kruopis 等 (1999) 在芬兰北部通过地基辐射计观测发现亮温随森林材积量的增加而升高, 因此把冠层透过率表达为森林材积量的对数函数。例如在 GlobSnow 算法中利用该模型对卫星亮温进行森林辐射校正 (Pulliainen, 2006), 验证发现雪水当量产品不确定性仍然随森林覆盖度增加呈指数上升 (Takala 等, 2011; Larue 等, 2017)。Langlois 等 (2011) 在加拿大魁北克通过机载辐射计观测建立了透过率与材积量的经验模型, 然后对 AMSR-E 卫星在 18.7 GHz 和 36.5 GHz 亮温进行辐射校正, 发现校正后的亮温 RMSE 分别降低了 14 和 27 K。Roy 等 (2012) 在同样在加拿大魁北克利用机载辐射计观测和植被 τ - ω 辐射模型优化得到透过率 γ 和单次散射反照率 ω , 然后建立透过率与材积量的经验模型, 并与 Kruopis 等 (1999) 和 Langlois 等 (2011) 发展的模型比较, 发现由于不同模型中单次散射反照率和土壤反射率不同, 造成了估算的冠层透过率存在差异。Roy 等 (2014) 在加拿大魁北克进一步结合植被 τ - ω 模型和土壤 QH 模型, 通过迭代优化方法确定冠层透过率 γ , 然后比较了森林透过率 γ 和叶面积指数、生物量、材积量之间的关系, 发现叶面积指数与透过率 γ 的相关性达 0.7; 并比较了模拟亮温和 AMSR-E 观测亮温, 发现在 37 GHz 频段的 RMSE 仅为 5 K。Cohen 等 (2015) 在芬兰北部结合植被 τ - ω 模型和机载辐射计观测优化得到冠层透过率, 从而建立透过率与森林材积量或郁闭度的经验模型, 发现郁闭度和材积量都能表征透过率的变化, 且亮温模拟精度明显高于 Kruopis 等 (1999) 和 Langlois 等 (2011) 发展的模型。Che 等 (2016) 在中国东北林区通过植被 τ - ω 模型和卫星观测优化得到冠层透过率, 发现与 Kruopis 等 (1999) 和 Langlois 等 (2011) 模型在 19 GHz 频

段差异较大。

在最新研究中, Li 等 (2019) 发现冠层微波透过率与植被温度存在很好的相关性, 即透过率随着温度降低 (零摄氏度以下) 而升高。这主要是由于植被自身的保护机制作用使得植被在寒冷的环境中仍然含有未冻水, 从而影响了植被的介电常数, 最终影响透过率 (Li 等, 2021)。如何从卫星遥感尺度区分植被温度和大气温度以及实现遥感应应用仍然需要进一步研究。

准确获取冠层微波透过率是建立林区雪深反演算法的关键过程与前提。通过以上分析发现目前发展的透过率经验模型大都基于地基或机载实验在点尺度建立, 如何在卫星像元尺度 ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) 建立普适性强的透过率模型对于提高林区雪深反演精度至关重要。其次, 目前的冠层透过率大多通过观测与模型模拟优化得到, 然后再建立透过率与森林参数的经验模型。不同的学者在相同的区域 (魁北克或芬兰北部), 优化的透过率 and 发展的经验模型往往存在差异, 这主要是模型简化和输入数据的不确定性引起的。通过植被辐射模型从理论上正向解算透过率能够在一定程度上降低优化带来的透过率不确定性。本文以我国东北森林区为研究区, 基于植被辐射传输模型, 提出了一种基于相邻像元的冠层微波透过率估算方法。该方法假设相邻的森林和非森林像元存在相同的积雪和环境参数 (气温、土壤等), 通过联立相邻像元的辐射传输方程即可解算冠层微波透过率, 最后建立森林透过率与生物量的半经验模型。该方法完全依赖卫星遥感数据建立的冠层透过率模型, 对于探索透过率模型在星载遥感尺度应用和提高林区的雪深反演精度至关重要。

2 研究区与数据

2.1 研究区

东北地区包括黑龙江、辽宁、吉林和内蒙古自治区的东部区域, 地表类型以森林、农田和草地为主, 同时分布大兴安岭、小兴安岭和长白山等山区 (图 1)。东北地区是中国典型的 3 大稳定积雪区之一, 同时森林面积占东北总面积的 40%。森林类型以落叶阔叶林、落叶针叶林、常绿针叶林和针阔混交林为主。东北地区海拔普遍较低, 但地形相对复杂, 例如分布在北部的大小兴安岭

和吉林省东南部的长白山。东北地区的深雪主要分布在草地和林地，多年平均雪深超过 10 cm，而

在中部的农田则分布较浅的积雪。

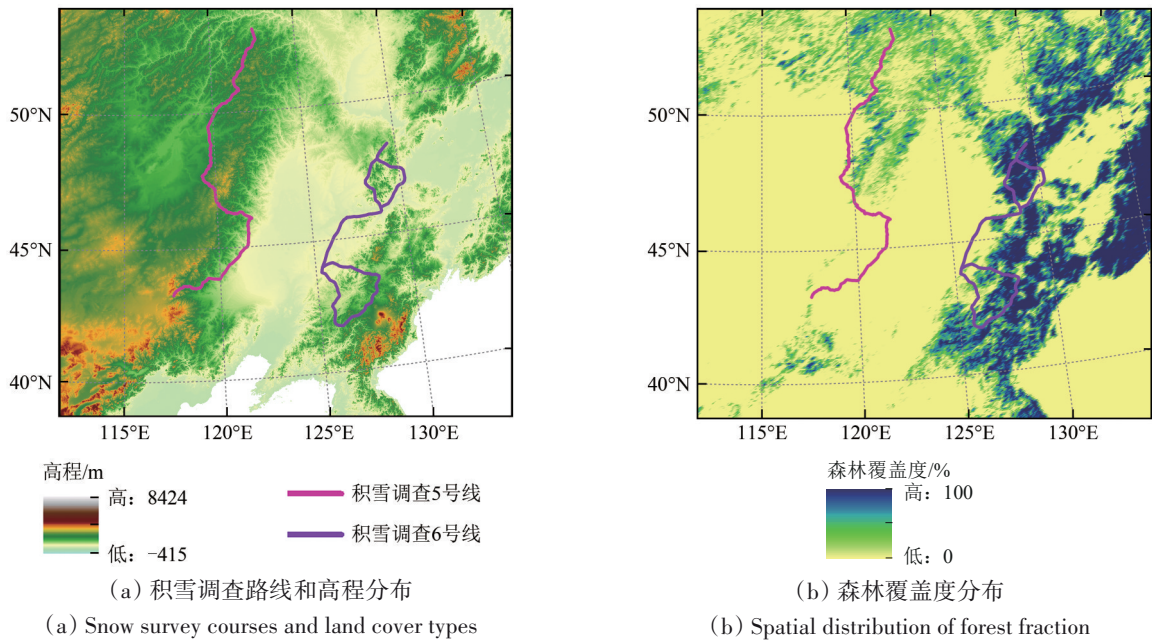


图1 积雪调查路线和森林覆盖度空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of snow course and forest fraction in Northeast China

2.2 地面观测数据

本研究用于发展和验证算法的地面观测数据主要包括气象站点观测和地面调查数据。2015年—2019年中国气象站点逐日数据来自中国气象局CMA (<http://data.cma.cn/en> [2021-11-20])，记录的变量包括雪深、站点名称、观测时间、气温、地理位置(经纬度)、高程等。地面调查数据主要来自积雪调查线路(图1)，该数据是在科技部中国积雪调查项目资助下，由国内多家单位联合在2017年—2019年野外实验采集(王建等, 2018)。东北地区包含5号线和6号线2条线路。5号线从锡林郭勒大草原一直向北到达大兴安岭的漠河地区，其地物类型主要为草地和林地(图1)。6号线包括2条环线，分布在长白山和小兴安岭地区，其地物类型为农田和林地(图1)。沿着5号线和6号线，大约每隔10—15 km有一个雪坑的测量，记录的参数包括雪深、雪密度、雪粒径、雪温、地温、气温、雪湿度、介电特性、海拔、经纬度等。积雪调查数据可以作为积雪微波辐射模型的输入，用以对比卫星观测和模型模拟。

本文中借助森林生物量信息来参数化植被冠层的影响。森林生物量数据来自中国林业科学研

究院资源信息研究所，是在国家高技术研究发展计划(863计划)“全球森林生物量和碳储量遥感估测关键技术”课题支持下完成。该产品是基于全国八次森林资源清查数据建立不同树种的单木生物量估算模型，然后借助机载激光雷达数据把生物量模型扩展到像元尺度，最后结合Landsat、MODIS光学遥感数据和星载ICESat数据建立生物量和植被特征参数(植被指数、郁闭度、树高等)的半经验模型，从而获取全球尺度空间分辨率为1 km的森林生物量数据(黄克标等, 2013; 傅煜, 2015)。本研究中通过空间重采样方法转换为空间分辨率为0.25°的等经纬度投影数据。地物类型覆盖数据来自中国科学院资源环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn/> [2021-11-20])，该数据是基于Landsat 8遥感影像，通过人工目视解译生成空间分辨率为1 km的栅格数据，然后统计0.25°×0.25°像元内1 km地物类型对应的像元个数，从而得到覆盖度数据。土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地6个一级类型。

2.3 卫星观测数据

本文采用日本宇航局JAXA (Japan Aerospace

Exploration Agency) 在2012年发射的 GCOM-W1 卫星携带的 AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) 传感器观测亮温。AMSR2 传感器的脚印 (footprint) 相对 FY-3/MWRI 和 SSM/I 要小, 可以降低混合像元带来的不确定性。AMSR2 包括 6.9 GHz 到 89 GHz 的 7 个频段、14 个通道的观测 (<http://gportal.jaxa.jp/gpr/>[2021-11-20])。其中 18.7 GHz 和 36.5 GHz 是雪水当量反演中常用的 2 个频段。官方提供了 L3 级亮温产品, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。为了降低湿雪和大气湍流带来的不确定性, 仅采用降轨数据 (凌晨 1:30)。

3 研究思路与方法

冠层微波透过率是植被辐射传输模型中的关键参数, 对于实现森林辐射校正和提高雪深反演精度至关重要。本研究通过空间搜索森林和非森林相邻像元, 联立两个相邻像元的微波辐射传输方程, 从而推算森林像元的冠层微波透过率, 最后借助森林生物量建立适用于星载遥感尺度的冠层微波透过率半经验模型。

3.1 相邻卫星像元空间搜索

本研究主要聚焦在森林冠层对微波亮温的影响, 因此未考虑植被和积雪微波辐射模型自身以及混合像元引起的误差。假设空间相邻的森林和非森林像元的积雪参数 (雪深) 和环境参数 (温度和土壤属性) 相同, 那么空间相邻像元的亮温差异主要由冠层引起的。首先根据森林生物量和覆盖度数据进行空间搜索, 即寻找相邻像元对 (森林和非森林像元)。图 2 (a) 为相邻像元的示意图, 即通过 3×3 的窗口搜索森林像元 (forest grid) 和临近的非森林像元 (open grid)。为了避免森林的影响, 非森林像元中主要地物类型覆盖度 (裸地+草地+农田) 必须 $>80\%$, 且森林生物量 $<5 \text{ t/hm}^2$; 而对于森林像元, 则需要森林覆盖度 $>30\%$, 且森林生物量要远远大于非森林像元的值。

根据以上设定的筛选规则, 在中国东北地区总共筛选得到 12 对临近像元, 空间分布和编号如图 2 (a) 所示。由于 #1、#2 和 #6 像元 (图 2) 对中的非森林像元存在森林生物量 >0 的情况, 而且和森林像元的生物量接近 (图 3), 因此将其剔除, 最后只剩下 9 个相邻像元对 (图 2 (a))。

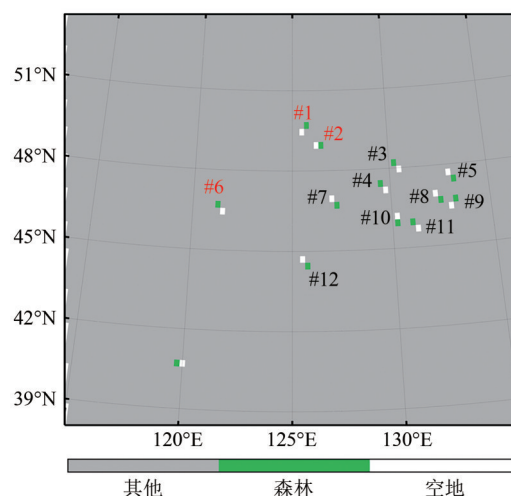


图 2 相邻像元对空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of adjacent pixels (forest vs. open) in Northeast China

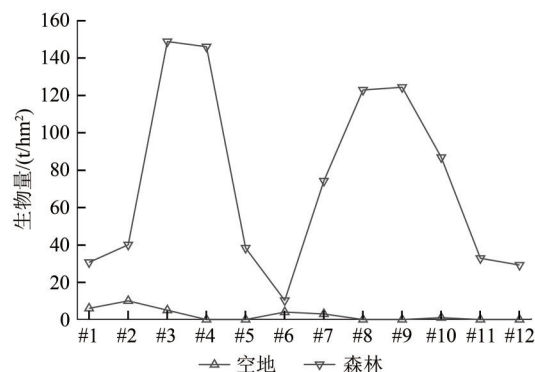


图 3 相邻像元对中的森林生物量对比

Fig. 3 Comparison of forest biomass for adjacent pixels

表 1 给出了像元对的基本信息, latitude 和 longitude 分别表示在 AMSR2 亮温产品中对应的经纬度, fraction 表示森林或非森林的覆盖度, biomass 表示森林生物量。

3.2 基于辐射传输理论推算微波透过率

对于非森林像元 (open grid), 其辐射传输方程可以表达为

$$Tb_{\text{obs,open}} = e_{\text{ground}} T_{\text{ground}} + Tb_{\text{atm}} (1 - e_{\text{ground}}) \quad (1)$$

式中, e_{ground} 表示积雪地表的发射率; T_{ground} 表示地表温度; $Tb_{\text{obs,open}}$ 表示 AMSR2 卫星观测值; Tb_{atm} 表示大气下行辐射, 可以表达为

$$Tb_{\text{atm}} = (1 - \gamma_{\text{atm,f}}) T_{\text{air}} \quad (2)$$

式中, $\gamma_{\text{atm,f}}$ 表示大气微波透过率 (Qiu 等, 2021); T_{air} 表示大气温度, 由气象站点反距离空间插值获取。

表1 相邻像元对的基本信息
Table 1 Basic metrics of adjacent pixels

像元	纬度/°N	经度/°E	地物类型	覆盖度/%	生物量/(t/hm ²)
#3	47.75	130.75	森林	82	149
	47.50	131.00	空地	80	5
#4	47.00	130.00	森林	81	146
	46.75	130.25	空地	89	0
#5	47.00	133.75	森林	47	38
	47.25	133.50	空地	95	0
#7	46.25	127.75	森林	31	74
	46.50	127.50	空地	93	6
#8	46.25	133.00	森林	35	123
	46.50	132.75	空地	98	0
#9	46.25	133.75	森林	74	124
	46.00	133.50	空地	95	0
#10	45.50	130.75	森林	53	87
	45.75	130.75	空地	93	1
#11	45.50	131.50	森林	61	33
	45.25	131.75	空地	84	0
#12	44.00	126.25	森林	48	29
	44.25	126.00	空地	88	0

森林覆盖度是影响卫星观测亮温和像元冠层透过率的关键参数 (Larue 等, 2017; Letcher 等, 2021)。由于自然界中并不存在纯森林像元, 因此森林像元亮温表达为森林和裸地端元的线性加权:

$$Tb_{obs,forest} = (1 - ff) \times Tb_{obs,open} + ff \times Tb_{forest} \quad (3)$$

式中, $Tb_{obs, open}$ 表示非森林像元亮温, 由式 (1) 提供; ff 表示森林覆盖度; $Tb_{obs, forest}$ 表示森林像元 AMSR2 观测亮温; Tb_{forest} 表示纯森林端元的亮温, 可以表达为:

$$Tb_{forest} = \gamma e_{ground} T_{ground} + \gamma(1 - \omega)(1 - \gamma)(1 - e_{ground})T_{veg} + (1 - \omega)(1 - \gamma)T_{veg} + \gamma^2(1 - e_{ground})T_{atm \downarrow} + \omega(1 - \gamma)T_{atm \downarrow} \quad (4)$$

式中, ω 表示单次散射反照率, 结合前人的研究设置为 0.05 (Roy 等, 2014; Li 等, 2019); T_{veg} 表示森林的物理温度, 假设与气温 T_{air} 相等; 通过联立以上方程, 解算得到冠层微波透过率 γ 。

3.3 冠层微波透过率确定

理论上时间序列的卫星观测亮温可以解算得到时间序列的冠层微波透过率, 但是考虑到该方法假设相邻像元的环境参数是一致的, 因此根据一定的规则筛选时间序列的亮温计算冠层透过率, 然后取平均值作为森林像元的参考透过率。为了尽可能的保证临近像元的环境参数一致, 设置如下规则:

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_{18.7GHz} > \gamma_{36.5GHz} \\ SD_{forest} = SD_{open} \pm 5 \text{ cm} \\ T_{air} < 270 \text{ K} \& T_{air,forest} = T_{air,open} \pm 2 \text{ K} \\ error_{18.7GHz} < 1 \text{ K} \& error_{36.5GHz} < 1 \text{ K} \end{array} \right.$$

根据物理基础, 波长越长, 透过率越高, 因此设定规则: (1) 以气象站点普通克里金插值作为雪深参考, 保证相邻像元对的雪深差异不得>5 cm, 因此设定规则; (2) 考虑到温度高于零摄氏度会导致湿雪的存在, 而且会使得能量交互变得复杂, 导致森林和裸地的温度存在差异, 同时温度会影响植被的含水量, 从而引起亮温对水分的敏感。因此以中国 2000 多个站点的反距离空间插值作为参考尽可能保证低温情况, 且临近像元的温度差异不能超过 2 K。解算一元多次方程时, 采用最小二乘法计算冠层透过率, 因此迭代误差要<1 K。

本研究中仅考虑透过率为森林生物量的函数, 并未考虑森林郁闭度和植被温度的影响, 主要是因为生物量是最敏感的参数, 同时季节性差异较小 (Roy 等, 2014)。冠层微波透过率与森林生物量的关系定义为线性形式:

$$\gamma_{canopy,f} = 1 - a \times biomass \quad (5)$$

式中, $\gamma_{canopy, f}$ 表示在频率 f 下的冠层透过率; $biomass$ 表示森林干生物量; a 表示拟合系数。当 $\gamma_{canopy, f} \leq 0$ 时, 则表示森林冠层为半无限介质, 完全以辐射为主。基于地基观测实验数据建立的模型大都采用指数型关系 (Kruopis 等, 1999; Cohen 等, 2015), 但在本文中设置为线性关系, 主要考虑到相邻像元对中提取的森林生物量数据最大为 149 t/hm², 并未出现透过率的饱和点; 理论上生物量无限大时, 冠层将由衰减体变为辐射体, 因此透过率变为零; 其次在粗像元尺度 (0.25°×0.25°) 的观测都是混合像元, 可能造成与地基或机载实验观测的透过率存在差异。

为了验证发展的透过率半经验模型, 本文中采用留一法 (Leave-One-Out Cross Validation) 进行交叉验证, 即通过选取 8 个点建立半经验模型, 保留 1 个点作为验证数据, 循环 9 次直至涵盖每一个点。

3.4 微波辐射传输模型模拟亮温

利用地基测量作为‘真实值’对冠层微波透过率模型在像元尺度验证是比较困难的, 因此本研究首先从亮温角度对微波透过率模型进行验证, 即对比微波辐射模型模拟值与卫星观测值。在微

波辐射模型中，用 AIEM 模型模拟土壤的辐射亮温 (Chen 等，2003)；用 HUT 模型模拟积雪辐射亮温 (Pulliainen 等，1999)；用植被 τ - ω 模型模拟冠层和地表的相互作用；用大气辐射传输模型模拟大气上行和下行辐射。表 2 总结了各个要素模型的关键参数和数据来源。

表 2 土壤—积雪—森林—大气辐射模型的关键参数和数据来源
Table 2 Key inputs of soil-snow-forest-atmosphere model and the data sources

模型	作用	关键参数	数据来源	说明
AIEM	模拟土壤微波发射率	土壤质地、土壤温度、粗糙度	土壤质地来自中国科学院地理数据中心，土壤粗糙度设置为定值(rms=3, cl=10)	土壤温度由气温和雪深关系换算 (Che 等, 2016)
HUT	模拟积雪辐射亮温	雪深、雪密度、粒径、雪温、气温	积雪调查线提供	雪粒径转换为有效雪粒径
ω - τ	模拟冠层和电磁波相互作用	冠层透过率、森林覆盖度、树温、生物量	冠层透过率由发展的半经验模型提供；覆盖度根据 1 km 的 land cover 统计；生物量由中国林业科学院提供	1 km 的 land cover 数据来自 http://www.resdc.cn/ ；假设树温和气温相同；单次散射反照率为 0.05
大气辐射传输模型	计算大气上行和下行辐射	大气微波透过率、气温、大气可降水数据	大气可降水来自 ERA5-land 再分析数据；大气透过率由半经验模型计算 (Qiu 等, 2021)	ERA5-land 数据来自 https://cds.climate.copernicus.eu/

利用 5 号线和 6 号线在积雪季 (2017 年—2018 年和 2018 年—2019 年) 观测的数据驱动微波辐射模型，其中土壤温度根据气温和雪深关系获取 (Che 等，2016)，土壤质地由中国科学院地理数据中心提供 (<http://www.resdc.cn> [2021-11-20])，土壤粗糙度设置为定值 (rms=3, cl=10)。冠层微波透过率由本研究中发展的半经验模型提供。大气微波透过率由大气可降水计算而来 (Qiu 等，2021)，其中大气可降水资料来自 ERA5-land (<https://cds.climate.copernicus.eu/> [2021-11-20])。

本文采用相关系数 (corr.coe)、均方根误差 (RMSE)、无偏的均方根误差 (unRMSE)、平均绝对误差 (MAE) 和平均偏差 (bias) 评估微波辐射模型、冠层透过率半经验模型和雪深反演算法的不确定性：

$$\text{corr.coe} = \frac{\sum_{i=1}^m (V_{\text{ref},i} - \overline{V_{\text{ref}}})(V_{\text{est},i} - \overline{V_{\text{est}}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (V_{\text{ref},i} - \overline{V_{\text{ref}}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m (V_{\text{est},i} - \overline{V_{\text{est}}})^2}} \quad (6)$$

$$\text{unRMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m |(V_{\text{ref},i} - \overline{V_{\text{ref}}}) - (V_{\text{est},i} - \overline{V_{\text{est}}})|^2}{m}} \quad (7)$$

$$\text{bias} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (V_{\text{est},i} - V_{\text{ref},i}) \quad (8)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |V_{\text{est},i} - V_{\text{ref},i}| \quad (9)$$

式中， m 表示样本个数； V_{est} 表示反演值； V_{ref} 表示参考值。在本文中 V 可表示亮温、透过率或雪深。

4 结果与分析

4.1 冠层微波透过率半经验模型发展

图 4 显示了在 2015 年—2016 年和 2016 年—2017 年两个积雪季的时间序列筛选得到的相邻像元对的冠层透过率箱型图和散点图。其中，箱型图中的红线表示平均值，可以看出冠层微波透过率随着生物量的增大而降低。图 4 中散点图表示不同频段下的冠层透过率平均值和生物量的拟合函数：

$$\gamma_{\text{canopy}, 18.7\text{GHz}} = 1 - 0.0022 \times \text{biomass} \quad (11)$$

$$\gamma_{\text{canopy}, 36.5\text{GHz}} = 1 - 0.0033 \times \text{biomass} \quad (12)$$

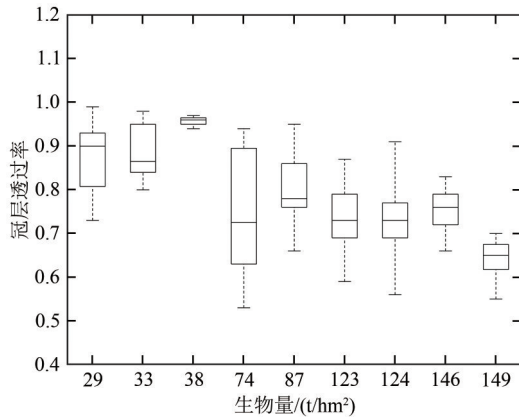
式中，biomass 表示森林干生物量； f 表示对应的频率。由于模型的训练数据中森林生物量最大为 149 t/hm²，因此该半经验模型仅适用于稀疏和中等密集程度的森林覆盖情况。

4.2 模型模拟及卫星观测对比

图 5 和图 6 分别显示了积雪调查 5 号线和 6 号线上森林区微波辐射模型模拟与 AMSR2 观测值的对比。其中红色实点表示模型中未考虑森林影响，而蓝色实点则表示考虑了森林的影响。可以看出，考虑森林辐射影响后的微波辐射模型在 18.7 GHz 和 36.5 GHz 的模拟值相对 AMSR2 观测值的偏差明显降低。特别是对于高频 36.5 GHz，由于积雪体散射效应强，积雪辐射亮温较低。如果不考虑森林的影响，微波辐射模型模拟值是明显低于观测值的；而考虑森林影响后，由于冠层的自身辐射

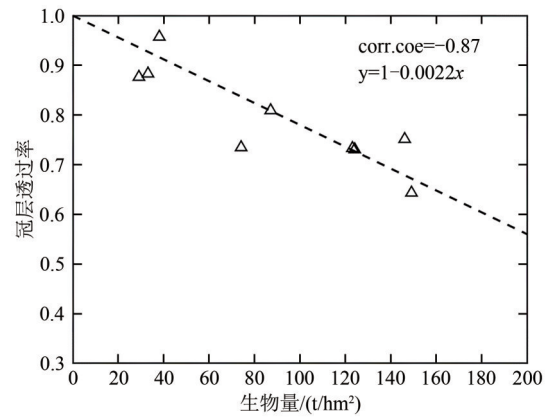
大于对积雪辐射的衰减, 因此冠层的存在增加了辐射亮温, 这与之前的实验观测是一致的 (Kruopis 等, 1999; Cohen 等, 2015)。对于 18.7 GHz, 其

穿透性要强于 36.5 GHz, 同时冠层衰减和辐射存在一定的抵消效应, 因此 18.7 GHz 受森林的影响明显低于 36.5 GHz。



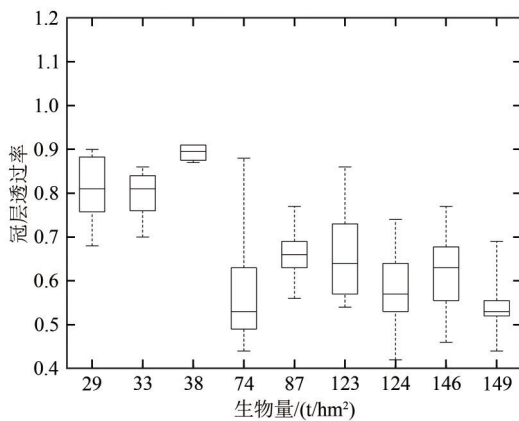
(a) 18.7 GHz 下冠层透过率箱形图

(a) Boxplots of transmissivity at 18.7 GHz



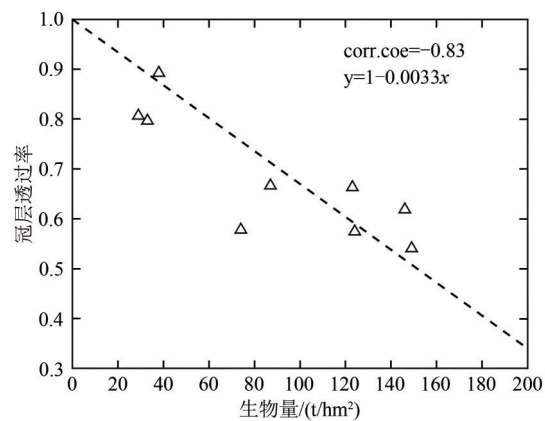
(b) 18.7 GHz 下冠层透过率和生物量散点图

(b) Scatter plots between transmissivity and biomass at 18.7 GHz



(c) 36.5 GHz 下冠层透过率箱形图

(c) Boxplots of transmissivity at 36.5 GHz

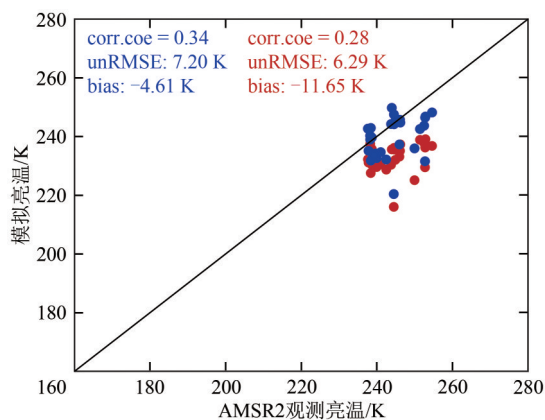


(d) 36.5 GHz 下冠层透过率和生物量散点图

(d) Scatter plots between transmissivity and biomass at 36.5 GHz

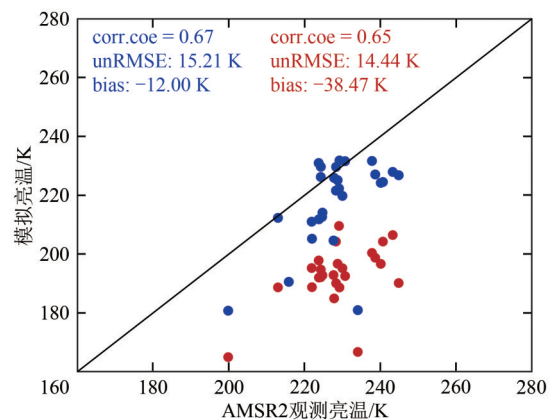
图4 不同频率下(18.7 GHz 和 36.5 GHz)冠层微波透过率与森林生物量关系

Fig. 4 The relationship between microwave transmissivity and forest biomass at 18.7 GHz and 36.5 GHz



(a) 2017年—2018年冬季, 18.7 GHz

(a) 18.7 GHz during 2017—2018 winter season



(b) 2017年—2018年冬季, 36.5 GHz

(b) 36.5 GHz during 2017—2018 winter season

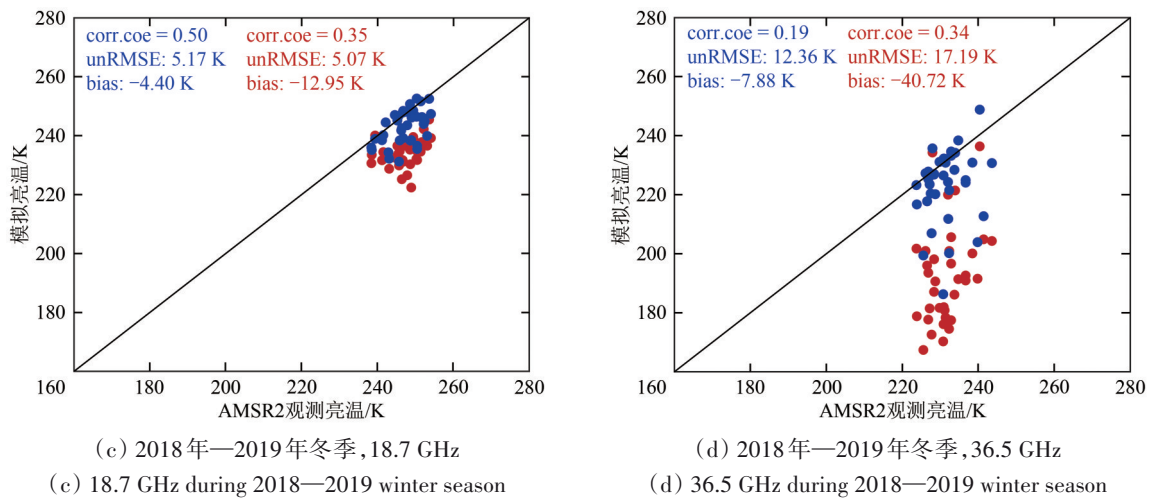


图5 积雪调查5号线微波辐射模型模拟与卫星观测在垂直极化的亮温对比

Fig. 5 Comparison of model simulations and AMSR2 observations along snow course five at vertical polarization

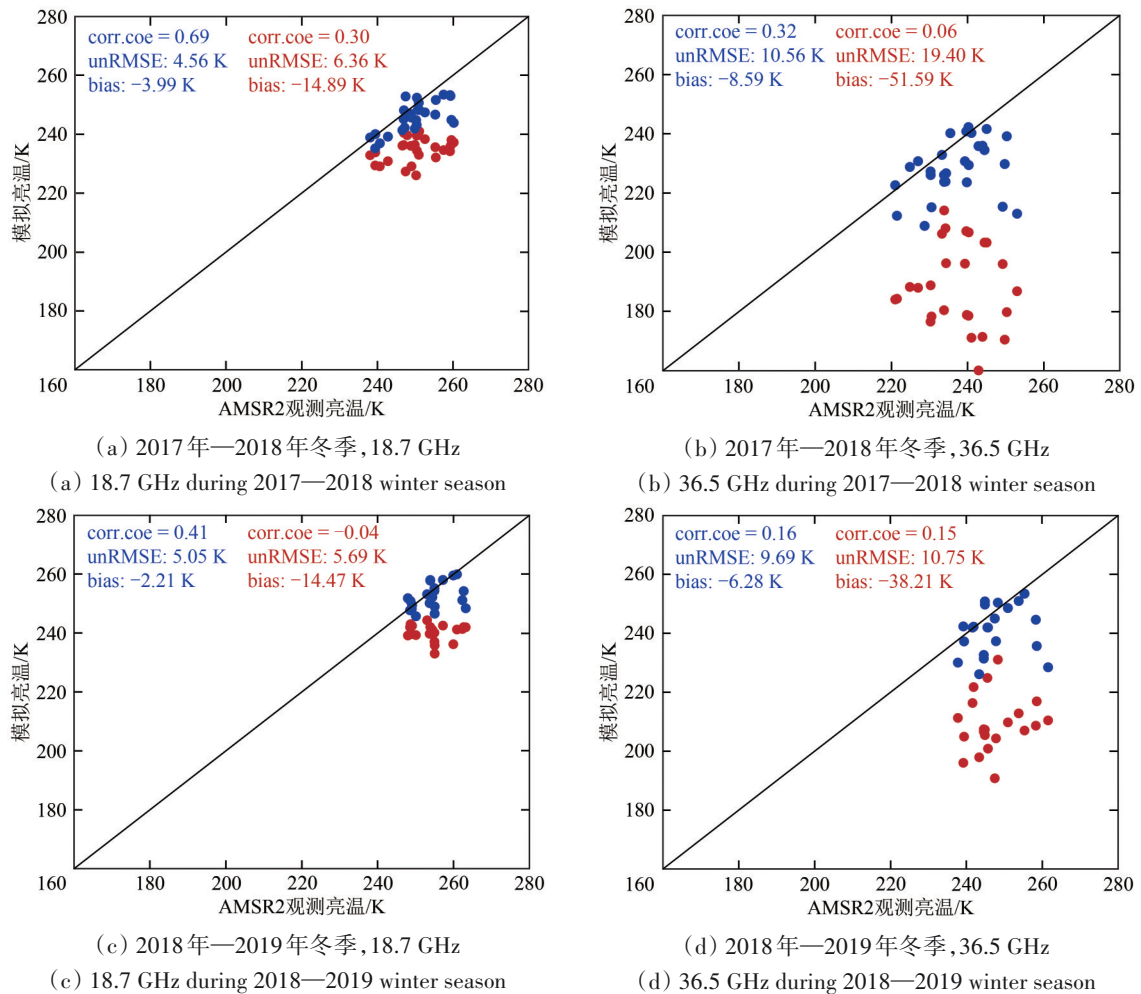


图6 积雪调查6号线微波辐射模型模拟与卫星观测在垂直极化亮温对比

Fig. 6 Comparison of model simulations and AMSR2 observations along snow course six at vertical polarization

表3总结了双频段在H极化(H-pol)和V极化(V-pol)下的模拟值和观测值误差统计。其中括号中的粗斜字体表示微波辐射模型中考虑森林的

影响。可以看出,考虑森林影响的模型模拟值偏差明显降低,而且V极化的模拟效果要明显优于H极化,这与HUT模型在H极化模拟值存在低估有关。

表3 微波辐射模型模拟值和AMSR2观测亮温对比

Table 3 The comparison of modeling Tb and AMSR2 observation

调查 线路	年份	通道	相关系数	偏差/K	样本数
5号线		18.7 H-pol	0.17 (0.33)	-34.10 (-13.35)	28
	2017年—	18.7 V-pol	0.28 (0.34)	-11.65 (-4.61)	
	2018年	36.5 H-pol	0.68 (0.66)	-55.65 (-18.80)	
		36.5 V-pol	0.65 (0.67)	-38.47 (-12.00)	37
	2018年—	18.7 H-pol	0.39 (0.30)	-39.65 (-16.13)	
	2019年	36.5 H-pol	0.33 (0.18)	-60.94 (-15.56)	
6号线		36.5 V-pol	0.34 (0.19)	-40.72 (-7.88)	28
	2017年—	18.7 H-pol	0.19 (0.36)	-40.25 (-9.37)	
	2018年	18.7 V-pol	0.30 (0.69)	-14.89 (-3.99)	
		36.5 H-pol	0.07 (0.32)	-70.30 (-16.07)	21
	2018年—	36.5 V-pol	0.06 (0.32)	-51.59 (-8.58)	
	2019年	18.7 H-pol	-0.23 (0.08)	-48.32 (-12.27)	
		18.7 V-pol	-0.04 (0.41)	-14.47 (-2.21)	
		36.5 H-pol	0.19 (0.11)	-65.18 (-12.22)	
		36.5 V-pol	0.15 (0.16)	-38.21 (-6.28)	

注：粗斜体表示微波辐射模型中考虑森林的影响。

4.3 冠层透过率半经验模型验证

在卫星像元尺度直接验证4.1节中发展的透过率半经验模型是比较困难的，本文采用‘留一法’进行交叉验证。图7显示半经验模型反演的透过率与参考透过率呈显著相关 (corr.coe > 0.7)，同时在18.7 GHz和36.5 GHz频段的反演误差 (unRMSE) 分别为0.0589和0.0787，整体表现较好。

4.4 森林辐射校正对于雪深反演精度影响

森林主要分布在中国东北地区，利用气象站点观测雪深作为像元‘真实值’，分析亮温差 (Tb_{18.7V}-Tb_{36.5V}) 与雪深的相关性 (图8)。图8中橙色误差棒表示卫星观测亮温差 (Tb_{18.7V}-Tb_{36.5V}) 与雪深的关系，而蓝色误差棒则表示经过森林辐射校正后的亮温差与雪深的关系。可以看出，经过冠层辐射校正后的亮温差与雪深的相关性显著提高，由原来的0.26提高到了0.46，且亮温差呈现出随着雪深的增加而增大的趋势。如果不考虑森林的影响，18.7 GHz和36.5 GHz的亮温差是普遍较低的，而且对雪深响应较差。

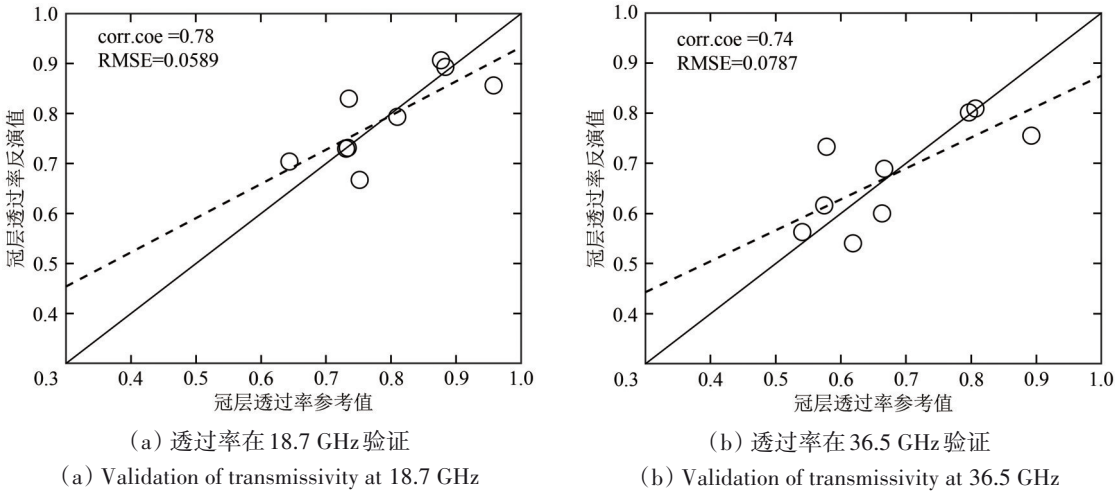


图7 基于‘留一法’的冠层透过率半经验模型验证

Fig. 7 Validation of canopy transmissivity model based on Leave-One-Out Cross approach

为了说明森林辐射校正对雪深反演精度的影响，因此选择传统的经验性雪深反演算法进行测试。18.7 GHz和36.5 GHz是通常用来反演雪深的频段，主要形式如下：

SD = a × (Tb_{18.7V} - Tb_{36.5V}) (13)

式中，a表示拟合系数，SD表示雪深 (cm)，Tb_{18.7V}和Tb_{36.5V}表示在18.7 GHz和36.5 GHz下垂直极化亮温 (单位为K)。考虑到V极化对积雪微观参数演

化相对H极化不敏感 (Derksen等，2010)，因此采用V极化亮温反演雪深。

考虑到当前已发展的双频段经验算法仍然存在较大不确定性，因此本研究以2018年和2019年站点观测雪深作为像元‘真值’，重新拟合了森林辐射校正前后的亮温差和雪深的经验关系：

SD = 0.72 × (Tb_{18.7V} - Tb_{36.5V}) (14)

SD = 0.38 × (Tb_{18.7V_corr} - Tb_{36.5V_corr}) (15)

式中, $Tb_{18.7V_corr}$ 表示经过森林辐射校正后的亮温。由于经过森林辐射校正后的亮温差要大于校正前的亮温 (图8), 因此拟合的系数偏小。

为了评估和对比反演算法的表现, 统一采用2015年—2017年的站点观测对两种算法进行验证, 结果见图9。可见相关系数 (corr.coe) 由未考虑森林影响的0.32提高到经过森林辐射校正后的0.49, 无偏均方根误差 (unRMSE) 由8.9 cm降低到7.8 cm, 绝对误差 (MAE) 由6.4 cm降低到5.6 cm。同时发现, 经过森林辐射校正后的反演算法能够在一定程度上体现深雪 (图9 (a) 对比图9 (b))。图10显示了经验性算法雪深估算值的偏差柱状图。可以看出, 经过森林辐射校正后的雪深估算值与站点观测值的偏差柱状图更接近标准正态分布, 偏差

为零的样本数明显多于未考虑森林影响的情况。

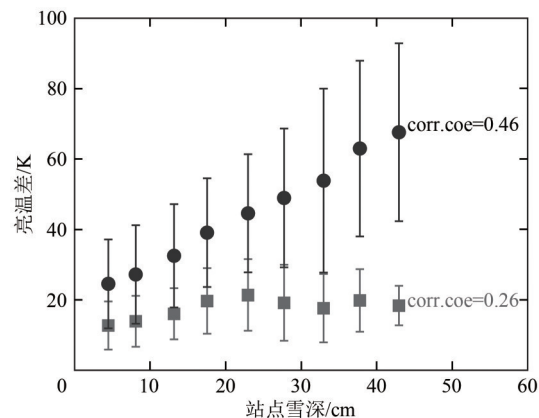
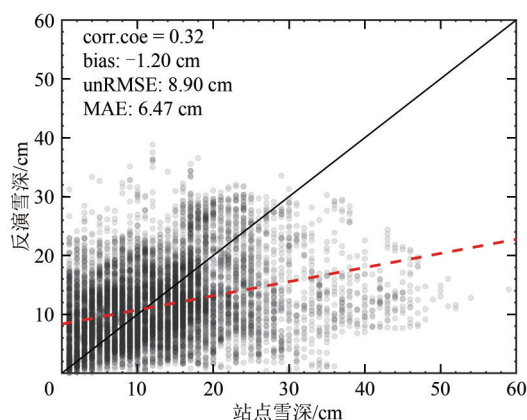
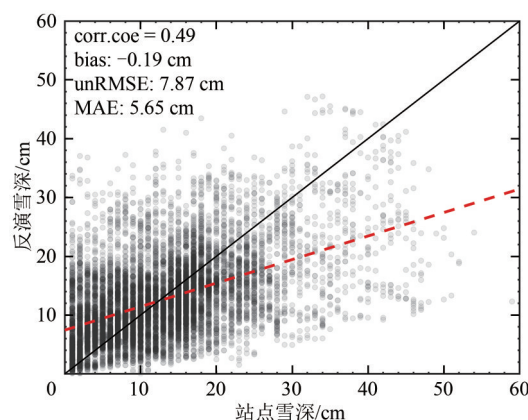


图8 森林辐射校正前后亮温差与站点雪深相关性
Fig. 8 Relationship between snow depth and Tb gradient before and after forest correction



(a) 未考虑森林影响雪深反演算法验证

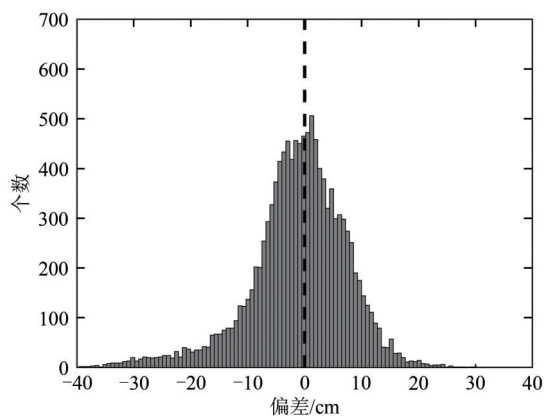


(b) 考虑森林影响的雪深反演算法验证

(a) Validation of retrieving algorithm without forest correction (b) Validation of retrieving algorithm with forest correction

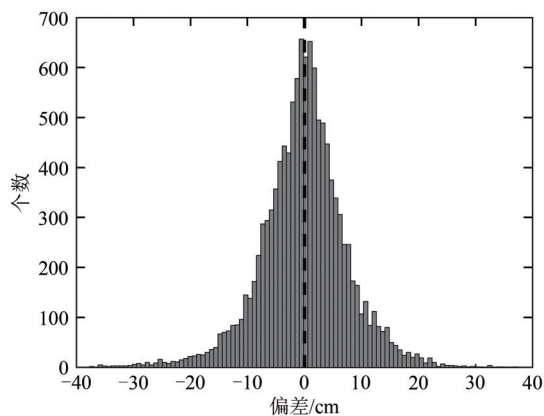
图9 站点观测和森林校正前后雪深反演算法估算值对比

Fig. 9 Comparison between station measurements and snow depth estimates



(a) 未考虑森林影响的偏差分布

(a) Histograms of bias without forest correction



(b) 考虑森林影响的偏差分布

(b) Histograms of bias with forest correction

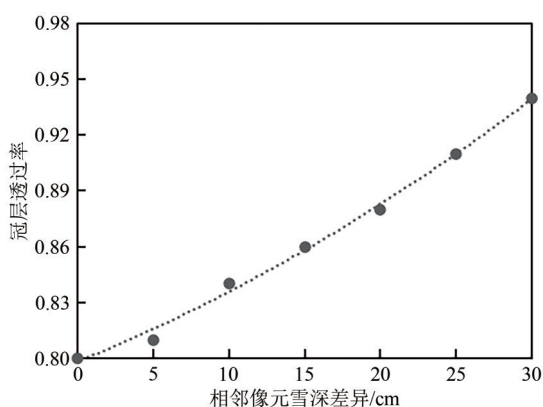
图10 雪深反演算法估算值和站点观测值偏差柱状图

Fig. 10 Histograms of bias between snow depth estimates and station measurements

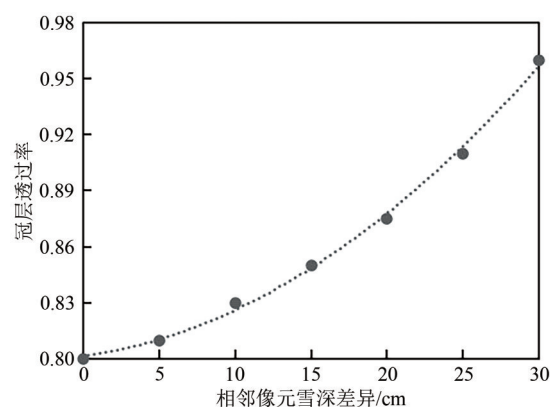
5 讨论

相邻像元法假设森林像元和非森林像元的雪深是相同的，但在真实自然界中往往由于冠层和树干的拦截和阻挡作用，森林像元的雪深通常小于非森林像元。在中国东北地区的地面观测表明森林和非森林地区的雪深差异最高为 5—10 cm。为了定量评估相邻像元对雪深差异引起的透过率不确定性，本研究通过考虑土壤、积雪、森林、大气多要素的微波辐射模型（表 2）进行敏感性分析。模型中的森林像元和非森林像元雪深初始值

相同，森林像元冠层透过率设置为 0.8。图 11 为 18.7 GHz 和 36.5 GHz 在垂直极化的分析结果。可以看出，透过率的不确定性随着相邻像元雪深差异增大而增大，即从初始的 0.8 上升为 0.94（18.7 GHz）和 0.96（36.5 GHz）。同时发现，相邻像元的雪深差异对高频透过率影响较大，18.7 GHz 的透过率变化呈近线性关系，而高频的 36.5 GHz 则呈现指数型关系。即使相邻像元对雪深差异达到 20 cm 时，引起的森林透过率差异仍然控制在 0.1 以内，因此认为雪深差异引起的冠层透过率不确定性较小。



(a) 18.7 GHz 频率下冠层透过率对相邻像元雪深差异敏感性
(a) Sensitivity of transmissivity to snow depth difference at 18.7 GHz



(b) 36.5 GHz 频率下冠层透过率对相邻像元雪深差异敏感性
(b) Sensitivity of transmissivity to snow depth difference at 36.5 GHz

图 11 冠层微波透过率对相邻像元雪深差异敏感性

Fig. 11 Sensitivity of canopy microwave transmissivity to snow depth difference between forest and open pixels

由于森林自身的保护机制，即使在 0℃ 以下时冠层中仍然存在未冻水，从而影响了物质的介电常数（Kou 等，2015），因此冠层微波透过率随着温度的降低而升高（Li 等，2019，2021）。其次，森林冠层微波透过率与森林树种是有关的，特别是针叶林和阔叶林存在明显差异（Wang 等，2021）。考虑到本研究提出的相邻像元方法假设相邻像元对的环境参数一致，同时如何在卫星像元尺度区分森林、积雪和大气温度仍然面临很大挑战，因此本研究中忽略了未冻水对冠层透过率的影响，可能会带来一定的不确定性。

本文中相邻像元对提取的最大生物量为 149 t/hm²，因此冠层透过率半经验模型仅适用于稀疏和中等密集程度的森林覆盖情况。另外，经过森林辐射校正得到的积雪辐射亮温仍然受到积雪微观参数（雪粒径）演化的影响，其散射效应甚

至会掩盖雪深的信息，从而造成雪深反演不确定性增大。因此，在未来的研究中将着重针对积雪微观参数演化带来的不确定性问题开展研究，最终发展耦合森林和雪粒径影响的高精度雪深反演算法，显著提高森林区的雪深估算精度。

6 结论

本文针对森林冠层带来的雪深反演不确定性问题，基于植被 τ - ω 模型提出了相邻像元的冠层微波透过率提取方法，进而借助森林生物量发展了冠层微波透过率半经验模型。为了说明发展的半经验模型在森林辐射校正和雪深反演中的作用，从多个角度进行了对比和评估。主要结论如下：（1）考虑森林影响的微波辐射模型模拟亮温更接近于卫星观测；（2）发展的透过率半经验模型在 18.7 GHz 和 36.5 GHz 频段的均方根误差 RMSE 分别

为0.0589和0.0787; (3) 经过森林辐射校正后的亮温差 ($Tb_{18.7V} - Tb_{36.5V}$) 与雪深的相关性由0.26提高到0.46; (4) 森林辐射校正使得雪深反演算法误差 (unRMSE) 由原来的8.9 cm降低到7.8 cm, 相关系数由0.32提高到0.49, 绝对误差MAE由6.4 cm降低到5.6 cm。本文中提出的冠层微波透过率半经验模型能够显著提高微波辐射模型在林区的表现, 为实现卫星遥感尺度的森林辐射校正提供参考和支撑。

志 谢 感谢积雪调查项目中参与野外观测的所有贡献者。同时特别感谢中国气象局和中国林业科学院分别提供的气象站点观测数据和森林生物量数据, 使得研究工作顺利开展。

参考文献 (References)

- Che T, Dai L Y, Zheng X M, Li X F and Zhao K. 2016. Estimation of snow depth from passive microwave brightness temperature data in forest regions of Northeast China. *Remote Sensing of Environment*, 183: 334-349 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.06.005]
- Che T, Li X, Li X W and Jiang L M. 2020. Developing cryospheric remote sensing, promoting scientific programme of earth's three poles. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 35(4): 484-493 (车涛, 李新, 李新武, 江利明. 2020. 冰冻圈遥感: 助力“三极”大科学计划. *中国科学院院刊*, 35(4): 484-493) [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20200323001]
- Chen K S, Wu T D, Tsang L, Li Q, Shi J C and Fung A K. 2003. Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(1): 90-101 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.807587]
- Cohen J, Lemmetyinen J, Pulliainen J, Heinilä K, Montomoli F, Seppänen J and Hallikainen M T. 2015. The effect of boreal forest canopy in satellite snow mapping-a multisensor analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(12): 6593-6607 [DOI: 10.1109/TGRS.2015.2444422]
- Derksen C, Toose P, Rees A, Wang L, English M, Walker A and Sturm M. 2010. Development of a tundra-specific snow water equivalent retrieval algorithm for satellite passive microwave data. *Remote Sensing of Environment*, 114(8): 1699-1709 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.02.019]
- Foster J L, Chang A T C and Hall D K. 1997. Comparison of snow mass estimates from a prototype passive microwave snow algorithm, a revised algorithm and a snow depth climatology. *Remote Sensing of Environment*, 62(2): 132-142 [DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00085-0]
- Fu Y. 2015. Uncertainty Assessment for Regional-Level Forest Above-Ground Biomass Estimates. Beijing: Chinese Academy of Forestry (傅煜. 2015. 区域尺度森林地上生物量的不确定性度量研究. 北京: 中国林业科学研究院)
- Gu L J, Ren R Z and Li X F. 2016. Snow depth retrieval based on a multifrequency dual-polarized passive microwave unmixing method from mixed forest observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(12): 7279-7291 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2599013]
- Huang K B, Pang Y, Shu Q T and Fu T. 2013. Aboveground forest biomass estimation using ICESat GLAS in Yunnan, China. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 17(1): 165-171 (黄克标, 庞勇, 舒清志, 付甜. 2013. 基于ICESat GLAS的云南省森林地上生物量反演. *遥感学报*, 17(1): 165-179) [DOI: 10.11834/jrs.20130436]
- Jiang L M, Cui H Z, Wang G X, Yang J W, Wang J, Pan F B, Su X and Fang X Y. 2020. Progress on remote sensing of snow, surface soil frozen/thaw state and soil moisture. *Remote Sensing Technology and Application*, 35(6): 1237-1262 (蒋玲梅, 崔慧珍, 王功雪, 杨建卫, 王健, 潘方博, 苏旭, 方西瑶. 2020. 积雪、土壤冻融与土壤水分遥感监测研究进展. *遥感技术与应用*, 35(6): 1237-1262) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.6.1237]
- Jiang L M, Wang P, Zhang L X, Yang H and Yang J T. 2014. Improvement of snow depth retrieval for FY3B-MWRI in China. *Science China Earth Sciences*, 57(6): 1278-1292 [DOI: 10.1007/s11430-013-4798-8]
- Kelly R. 2009. The AMSR-E snow depth algorithm: description and initial results. *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, 29(1): 307-317 [DOI: 10.11440/rssj.29.307]
- Kou X K, Chai L N, Jiang L M, Zhao S J and Yan S. 2015. Modeling of the permittivity of holly leaves in frozen environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(11): 6048-6057 [DOI: 10.1109/TGRS.2015.2431495]
- Kruopis N, Praks J, Arslan A N, Alasalmi H M, Koskinen J T and Hallikainen M T. 1999. Passive microwave measurements of snow-covered forest areas in EMAC'95. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(6): 2699-2705 [DOI: 10.1109/36.803417]
- Langlois A, Royer A, Dupont F, Roy A, Goita K and Picard G. 2011. Improved corrections of forest effects on passive microwave satellite remote sensing of snow over boreal and subarctic regions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(10): 3824-3837 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2138145]
- Larue F, Royer A, De Sève D, Langlois A, Roy A and Brucker L. 2017. Validation of GlobSnow-2 snow water equivalent over Eastern Canada. *Remote Sensing of Environment*, 194: 264-277 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.027]
- Letcher T, Vuyovich C, Langlois A and Roy A. 2021. Understanding uncertainty of snow radiative transfer modeling within a mixed deciduous and evergreen forest. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 8225-8235 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3099944]
- Li Q H, Kelly R, Lemmetyinen J, De Roo R D, Pan J M and Qiu Y B. 2021. The influence of tree transmissivity variations in winter on satellite snow parameter observations. *International Journal of*

- Digital Earth, 14(10): 1337-1353 [DOI: 10.1080/17538947.2021.1950852]
- Li Q H, Kelly R, Leppänen L, Vehviläinen J, Kontu A, Lemmetyinen J and Pulliainen J. 2019. The influence of thermal properties and canopy-intercepted snow on passive microwave transmissivity of a scots pine. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(8): 5424-5433 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2899345]
- Pulliainen J, Grandell J, Hallikainen M. 1999. HUT snow emission model and its applicability to snow water equivalent retrieval. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3): 1378-1390 [DOI: 10.1109/36.763302]
- Pulliainen J. 2006. Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and sub-arctic zones by assimilating space-borne microwave radiometer data and ground-based observations. *Remote Sensing of Environment*, 101(2): 257-269 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.01.002]
- Qiu Y B, Shi L J, Lemmetyinen J, Shi J C and Wang R Y. 2021. Atmospheric correction to passive microwave brightness temperature in snow cover mapping over China. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(8): 6482-6495 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3031837]
- Roy A, Royer A and Hall R J. 2014. Relationship between forest microwave transmissivity and structural parameters for the Canadian boreal forest. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(10): 1802-1806 [DOI: 10.1109/LGRS.2014.2309941]
- Roy A, Royer A, Wigneron J P, Langlois A, Bergeron J and Cliche P. 2012. A simple parameterization for a boreal forest radiative transfer model at microwave frequencies. *Remote Sensing of Environment*, 124: 371-383 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.05.020]
- Shi J C, Xiong C and Jiang L M. 2016. Review of snow water equivalent microwave remote sensing. *Science China Earth Sciences*, 59(4): 731-745 (施建成, 熊川, 蒋玲梅. 2016. 雪水当量主被动微波遥感研究进展. *中国科学: 地球科学*, 46(4): 529-543) [DOI: 10.1360/N072015-00031]
- Takala M, Luojus K, Pulliainen J, Derksen C, Lemmetyinen J, Kärnä J P, Koskinen J and Bojkov B. 2011. Estimating northern hemisphere snow water equivalent for climate research through assimilation of space-borne radiometer data and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 115(12): 3517-3529 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.08.014]
- Wang G R, Li X F, Chen X X, Jiang T, Zheng X M, Wan Y L, Wan X K and Wang J. 2021. An investigation on microwave transmissivity at frequencies of 18.7 and 36.5 GHz for diverse forest types during snow season. *International Journal of Digital Earth*, 14(10): 1354-1379 [DOI: 10.1080/17538947.2021.1955985]
- Wang J, Che T, Li Z, Li H Y, Hao X H, Zheng Z J, Xiao P F, Li X F, Huang X D, Zhong X Y, Dai L Y, Li H X, Ke C Q and Li L H. 2018. Investigation on snow characteristics and their distribution in China. *Advances in Earth Science*, 33(1): 12-15 (王建, 车涛, 李震, 李弘毅, 郝晓华, 郑照军, 肖鹏峰, 李晓峰, 黄晓东, 钟歆玥, 戴礼云, 李红星, 柯长青, 李兰海. 2018. 中国积雪特性及分布调查. *地球科学进展*, 33(1): 12-15) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2018.01.0012]
- Wu L L, Li X F, Zhao K, Zheng X M, Ding Y L, Li Y Y and Ren J H. 2015. The space-time analysis and validation of snow depth inversion algorithm of passive microwave in northeast China. *Remote Sensing Technology and Application*, 30(3): 565-572 (武黎黎, 李晓峰, 赵凯, 郑兴明, 丁艳玲, 李洋洋, 任建华. 2015. 被动微波雪深反演算法在东北地区的时空分析与验证. *遥感技术与应用*, 30(3): 565-572) [DOI: 10.11873/J.ISSN.1004-0323.2015.3.0565]
- Yang J W. 2021. Research on the Snow Depth Retrieval Algorithm Based on A Synthetic Microwave Radiative Model. Beijing: Beijing Normal University (杨建卫. 2021. 基于综合微波辐射模型的雪水当量反演算法研究. 北京: 北京师范大学)
- Yang J W, Jiang L M, Wu S L, Wang G X, Wang J and Liu X J. 2019. Development of a snow depth estimation algorithm over China for the FY-3D/MWRI. *Remote Sensing*, 11(8): 977 [DOI: 10.3390/rs11080977]

A semi-empirical microwave transmissivity model for forest canopies during the snow season

YANG Jianwei¹, JIANG Lingmei¹, WU Shengli^{2,3}, LUAN Yinghong⁴, PAN Jinmei⁵, SHI Jiancheng⁵

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather), Beijing 100081, China;

3. Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081, China;

4. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China;

5. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: Spaceborne passive microwave remote sensing is a crucial technique for monitoring the global spatiotemporal distribution of snow depth. The forest canopy not only attenuates microwave radiation from the soil but also emits radiation into the sensor. Therefore, forest canopies increase the uncertainty of snow depth retrievals via passive microwave sensing. This research aimed to develop a microwave transmissivity model at the scale of satellite observations ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) to realize forest correction via satellite observations. The

proposed novel method (hereafter referred to as the adjacent pixel approach) for estimating canopy transmissivity combines the radiative transfer functions of adjacent forests and open pixels. A semi-empirical transmissivity model based on forest biomass was built to correct satellite-observed brightness temperatures. The modeling brightness temperature data were compared with the AMSR2 observations in Northeast China to demonstrate the ability of the proposed transmissivity model to retrieve snow depth.

As forest canopy effects were ignored by the microwave emission model, the brightness temperature was somewhat underestimated with respect to the satellite observations. By contrast, the proposed method corrected the information by using AMSR2 observations; hence, the model simulations were much closer to the AMSR2 observations. Then, the proposed semi-empirical microwave transmissivity model was further verified via the leave-one-out cross-validation method. The correlation coefficient between the estimates and reference values reached 0.7, and the RMSEs were 0.0589 and 0.0787 at 18.7 GHz and 36.5 GHz, respectively. The relationship between the brightness temperature spectral difference ($Tb_{18.7V} - Tb_{36.5V}$) and ground-based snow depth improved after forest correction, from 0.26 before correction to 0.46 after correction. An empirical retrieval algorithm was subsequently selected for testing to demonstrate the improvement in snow depth retrieval via forest radiation correction. The RMSE was 7.8 cm with forest radiation correction, whereas it was 8.9 cm without correction. Moreover, the correlation coefficient increased from 0.32 to 0.49.

The proposed semi-empirical transmissivity method can significantly improve the performance of microwave radiative transfer models in forested areas. Moreover, this method can directly correct satellite-based brightness temperatures, thereby reducing the uncertainty of estimated snow depth values. This study provides a reference and guideline for improving snow depth under forest canopies.

Key words: passive microwave remote sensing, forest canopy, adjacent pixel approach, microwave transmissivity, snow depth

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.42090014, 42201346); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2021NTST02); Industry-University Research Cooperation Fund, China Aerospace Technology Group Co., Ltd (No. SAST2020-082)