

DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0410

LIU Hao, XIAO Pengfeng, ZHANG Xueliang, et al. The characteristics of snow cover albedo in Northeast China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(3): 554-562. [刘豪, 肖鹏峰, 张学良, 等. 东北地区积雪反照率特性[J]. 冰川冻土, 2019, 41(3): 554-562.]

东北地区积雪反照率特性

刘豪^{1 2 3}, 肖鹏峰^{1 2 3}, 张学良^{1 2 3}, 冯学智^{1 2 3}, 杨永可^{1 2 3},
胡瑞^{1 2 3}, 张正^{1 2 3}, 盛光伟^{1 2 3}

(1. 南京大学地理与海洋科学学院地理信息科学系, 江苏南京 210023; 2. 卫星测绘技术与应用国家测绘地理信息局重点实验室, 江苏南京 210023; 3. 江苏省地理信息技术重点实验室, 江苏南京 210023)

摘要: 利用2017年12月至2018年3月在东北地区获取的82个观测点的积雪反照率数据, 从积雪反照率的时序差异、空间特点、影响因素三个方面开展了积雪反照率时空特点研究。结果表明: (1) 在时间上, 随着积雪积累时间的增加, 积雪反照率逐渐降低, 最大下降速率为 0.003 d^{-1} 。(2) 在空间上, 积雪反照率在东西方向差异显著, 大兴安岭东西两侧地区的积雪反照率均值分别为0.679和0.751; 在同一地区内, 积雪反照率在雪表层含水量、雪粒径等因素影响下也存在一定差异, 大兴安岭西侧地区的积雪反照率北低南高, 大兴安岭东侧地区的积雪反照率北高南低。(3) 耕地上的农作物留茬对积雪反照率影响较大, 短时间内天气变化对积雪反照率影响较小。

关键词: 东北地区; 积雪; 反照率; 时空差异

中图分类号: P468.0+25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2019)03-0554-09

0 引言

反照率是地表反射的太阳辐射与接收的太阳总辐射的比值, 是地表辐射收支平衡中的重要参数^[1-2]。积雪是冰冻圈重要的组成部分, 作为地球上反照率最高的地表类型之一, 能将大部分入射辐射能量反射回天空, 其反照率的变化影响着整个地-气系统的能量收支^[3-4], 进而改变大气热力、动力过程, 影响气候变化^[5-7]。我国稳定积雪区面积达 $420 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中东北地区面积达 $140 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[8], 是我国三大稳定积雪区之一^[9]。降雪是我国东北地区冬季降水的主要形式, 积雪融水是重要的淡水资源, 冬季积雪可以有效缓解春旱, 冰雪融水是春季河川径流的主要补给来源, 占径流量的10%~15%^[10-11], 对工农业生产和社会经济发展具有重要意义。

研究人员在不同尺度上对积雪反照率的遥感反演方法、时空特征以及对气候变化的影响等进行了

研究, 取得了许多研究成果。在大尺度上, 美国2002年发展了首个全球逐日积雪反照率算法^[12], 并将其作为MODIS积雪产品的一个数据集(snow albedo daily, SAD); Curry等^[13]通过雪/海冰反照率的反馈机制解释了地表反照率对全球气候变化的影响; 徐兴奎等^[14]利用遥感手段分析了中国地表积雪动态分布及其反照率变化。在西北地区, 曹梅盛等^[15]对乌鲁木齐市郊积雪反照率变化特征及其影响因素进行了分析, 积雪反照率受城市污染影响显著; 郝晓华等^[16]利用野外观测数据, 分析了祁连山冰沟流域积雪反照率变化特征, 发现没有新降雪的补充时, 反照率逐日降低; 潘海珠等^[17]对祁连山区MODIS积雪反照率产品进行了验证, 发现其在山区的精度明显低于平坦地区。在青藏高原地区, 韦志刚等^[18]探究了青藏高原积雪分布特征, 积雪面积的变化对地表反照率影响较大; 吴雪娇等^[19]利用MODIS数据对长江源区2001-2010年积雪反照率时空变化特征进行了分析, 得到了该地区积雪

收稿日期: 2018-07-12; 修订日期: 2018-09-11

基金项目: 国家科技基础资源调查专项(2017FY100502); 国家自然科学基金项目(41671344)资助

作者简介: 刘豪(1995-), 男, 湖南邵阳人, 2017年在中南林业科技大学获学士学位, 现为南京大学在读硕士研究生, 从事积雪遥感研究。E-mail: lhlhliu@gmail.com

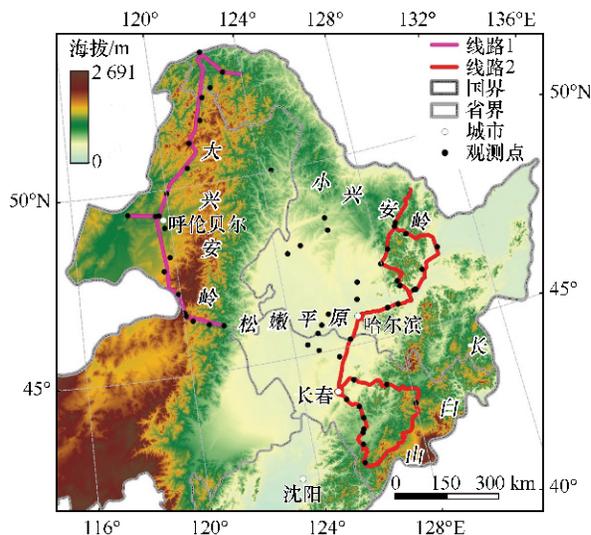
通信作者: 肖鹏峰, E-mail: xiaopf@nju.edu.cn, xiaopf@gmail.com.

反照率高、低值分布中心; 姚济敏等^[20]、肖瑶等^[21]利用台站辐射、积雪等资料探究了多年冻土区地表反照率特征, 指出受到积雪的影响, 冬、春季的地表反照率远大于夏、秋季。而目前对东北地区积雪反照率特性分析和大面积野外观测尚未见报道, 同时利用遥感技术获取积雪反照率以及对产品的验证也需要地面同步观测数据的支持。

因此, 在国家科技基础资源调查专项“中国积雪特性及分布调查”项目支持下, 于 2017 年 12 月至 2018 年 3 月在东北地区开展了三次积雪特性调查, 获取了大量积雪反照率数据。本文利用此次野外观测数据, 对该地区积雪反照率特性、时空差异进行分析。

1 研究区概况

研究区位于我国的东北部, 包括吉林省、黑龙江省以及内蒙古自治区的东北部, 地理范围介于 $118^{\circ}17' \sim 130^{\circ}19' E$ 、 $41^{\circ}52' \sim 53^{\circ}28' N$ (图 1), 是我国三大稳定积雪区之一。该区地貌类型复杂多样, 东、西、北三面被大、小兴安岭、长白山系的高、中山及低山丘陵所环绕, 中部是平原, 地势呈三高一低的特点。属于北温带季风气候区, 大陆性气候明显, 冬季漫长寒冷^[11]。受西伯利亚气团等影响, 1 月平均最低气温在 $-30^{\circ}C$ 以下, 绝对最低温度在 $-45^{\circ}C$ 以下^[22]。



底图来源: 国家测绘地理信息局标准地图服务系统, 审图号: GS(2016) 2886

图 1 研究区及调查线路示意图

Fig. 1 Map showing the study area and the survey routes

该区积雪分布呈北多南少、山区多于平原的特点。多年平均积雪深度超过 5 cm, 其中大、小兴安

岭和东部山地因纬度、地势较高, 气温低, 降雪量多, 最大年积雪深度在 30 cm 以上; 而中部平原西临大兴安岭, 来自西或西北的气流到此受下沉作用, 同时受东南山地阻挡, 导致暖湿气流不易到达, 降雪量较少, 最大年积雪深度在 10 cm 以上。由于降雪日数多、气温低等特点, 该区积雪密度较大, 平均积雪密度约 $0.15 g \cdot cm^{-3}$ ^[23]。

根据研究区的积雪分布特征, 此次野外积雪调查分为两条线路(图 1): 线路 1 积雪反照率观测点分布在内蒙古自治区东北部与黑龙江省西北部地区, 主要集中在大兴安岭西侧地区, 平均海拔在 500 m 以上; 线路 2 观测点分布在松嫩平原、小兴安岭、长白山等地区, 位于大兴安岭东侧地区, 平均海拔在 300 m 以下。

为了分析观测期间每条观测线路对应的天气情况, 选取呼伦贝尔市的天气代表大兴安岭西侧地区的天气情况, 选取哈尔滨市的天气代表大兴安岭东侧的天气情况(图 2)。线路 1 的第一次观测和线路 2 的第二次观测期间天气较为稳定, 而两条线路其他几次观测期间均发生了新降雪, 特别是在第三次观测前发生了强降雪。根据中国天气网(www.weather.com.cn)提供的数据, 2018 年 2 月 28 日至 3 月 1 日, 受到来自西伯利亚冷空气和日本海暖湿气流等影响, 黑龙江省和吉林省部分地区迎来当年冬季最强降雪, 雪深增加了 5 ~ 10 cm。

2 野外观测方法

野外积雪观测时间为 2017 年 12 月至 2018 年 3 月, 时间跨越了积雪积累期、稳定期和消融期, 第一次观测时间为 2017 年 12 月 14 日至 30 日, 第二次观测时间为 2018 年 1 月 24 日至 2 月 5 日, 第三次观测时间为 2018 年 3 月 4 日至 13 日, 每次分别观测了 21、36、25 个点, 下垫面类型为草地、耕地、裸地三类, 主要为耕地, 所选的样区地表相对均一。此外, 在积雪稳定期和消融期, 均开展了一次农田样方观测(1 km × 1 km 和 2 km × 2 km)。

在野外观测时, 使用辐射表同时测量下行辐射(太阳总辐射)和上行辐射(地表反射辐射), 计算两者的比值即为反照率。受观测仪器调配的限制, 野外观测期间分别使用了两套不同的辐射观测仪器, 分别为 CNR4 净辐射传感器和 CMP3 短波辐射传感器, 具体参数见表 1。观测时, 辐射表架设在离积雪表面 1 m 高的平衡杆上, 一个 CNR4 辐射表可同时测量上行和下行辐射, CMP3 为两个辐射表

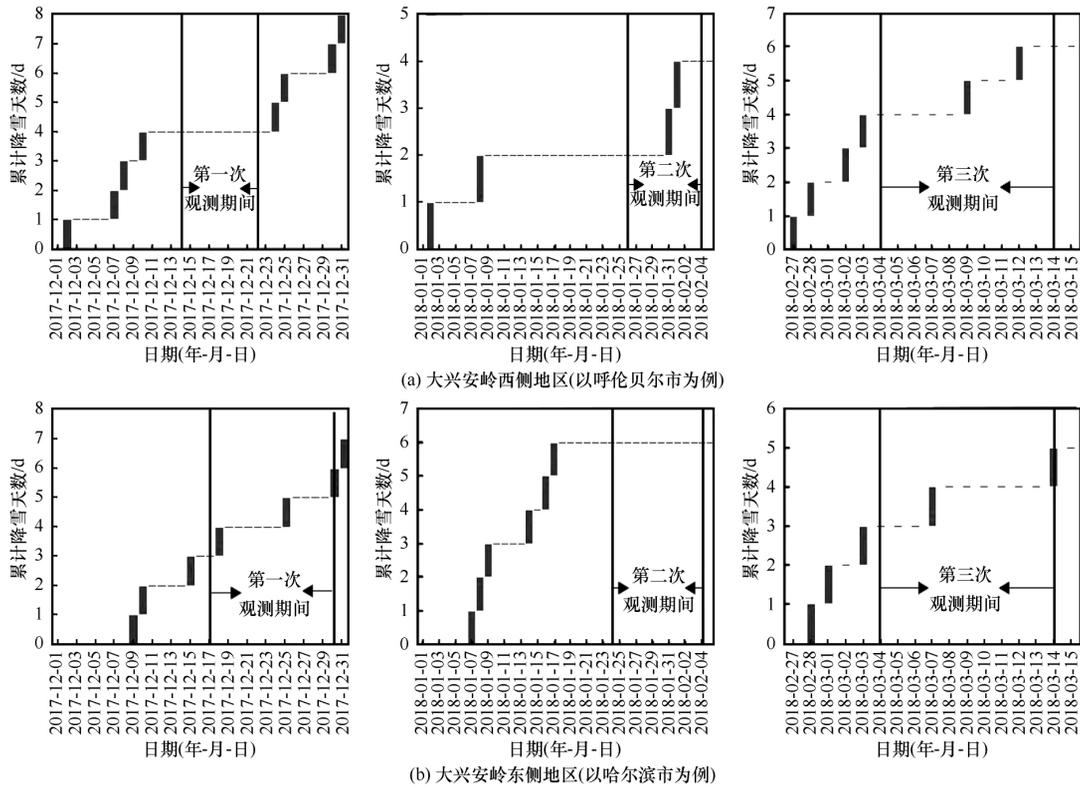


图 2 观测期间前后的天气情况

Fig. 2 Variations of the cumulative snowfall days before and after the first , second and third observation periods to the west (a) and the east (b) of the Greater Khingan Range

表 1 CNR4 与 CMP3 辐射表的主要参数

Table 1 Main parameters of CNR4 net radiation sensor and CMP3 short-wave radiation sensor

参数	范围或精度
光谱	300 ~ 2 800 nm
灵敏度	5 ~ 20 $\mu\text{V} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
工作温度	-40 ~ 80 $^{\circ}\text{C}$
响应时间	< 18 s

分别测量上行和下行辐射(图 3)。平衡杆平行于太阳入射光线,它朝向太阳的一端测量上行辐射,辐射表视场内无阴影遮挡。数据采集间隔设置为 20 s,每个观测点的观测时间为 5 ~ 10 min。

3 结果与分析

通过在东北地区开展的三次样带观测,共获得了 82 个观测点的积雪反照率数据,以及相应的雪

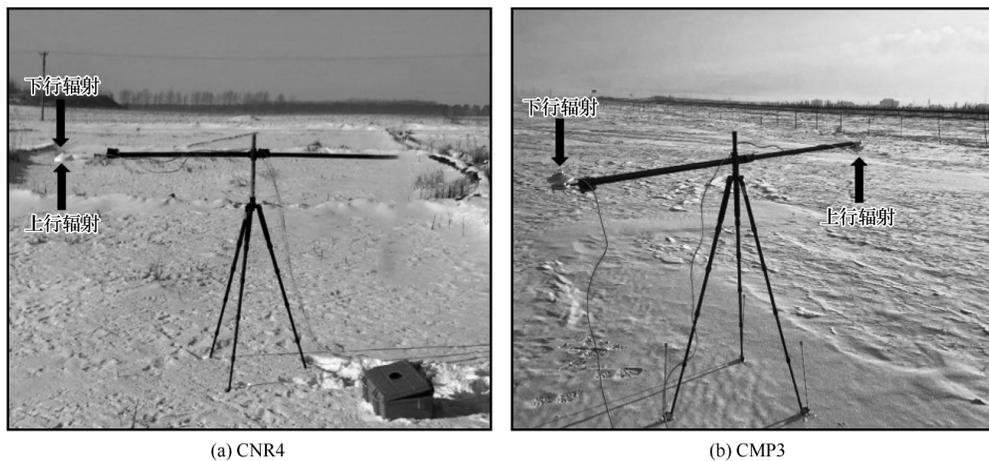


图 3 积雪反照率观测

Fig. 3 Photos showing the observation by CNR4 net radiation sensor (a) and CMP3 short-wave radiation sensor (b)

深、雪粒径、雪层温度和雪层含水量等参数,三次不同观测时间分别对应积雪的积累期、稳定期和消融期,部分积雪参数情况如表 2 所示。

3.1 积雪反照率的时序变化

研究区不同积雪时期的反照率差异显著,其中积累期的反照率最大,达到 0.745; 稳定期的反照

表 2 研究区两条调查线路情况

Table 2 Mean snow surface temperatures and mean snow depths along the survey routes in snow accumulation, stabilization and ablation periods

线路	分期	日期(年-月-日)	观测点数量	雪表平均温度/℃	平均雪深/cm
1	积累期	2017-12-14/2017-12-22	9	-21.6	16.1
	稳定期	2018-01-26/2018-02-04	18	-17.9	14.3
	消融期	2018-03-04/2018-03-13	9	-8.7	12.5
2	积累期	2017-12-17/2017-12-30	12	-10.3	6.9
	稳定期	2018-01-24/2018-02-05	18	-14.0	12.5
	消融期	2018-03-04/2018-03-12	16	-7.6	17.8

率为 0.639,较积累期下降了 0.106,最大下降速率达到 0.003 d^{-1} ; 到消融期时,由于观测前发生了新降雪,反照率出现了升高的现象,较稳定期升高了 0.086,达到 0.725。各线路积雪反照率变化如图 4 (a) 所示,在三个积雪时期,积雪反照率都呈先下降后上升的趋势,但线路 2 的观测结果与线路 1 有明显差异。线路 1 在积雪积累期时反照率最高,均值为 0.846,随着积雪积累时间的增加,反照率逐渐降低,到积雪稳定期时反照率为 0.637,积雪消融期时反照率上升到 0.716; 而线路 2 在积雪消融期时反照率最高,均值为 0.730,积雪积累期和稳定期的反照率相差不大,分别为 0.668 和 0.640,相差 0.028,波动较小。

一般来言,积雪消融期的反照率要低于稳定

期,但有新降雪发生时,将使其反照率高于稳定期时的反照率。一方面,从积雪物理参数分析,以雪表层(0~5 cm)粒径为例,雪表层粒径与积雪反照率变化趋势相对应,雪表层粒径先增大后降低[图 4(b)],积雪反照率则先下降后升高,这与反照率随着雪粒径增大而减小的认识相一致^[24]。另一方面,从降雪过程分析,第一次和第三次观测开始时,距最近一次发生的新降雪只间隔 1~2 天,而第二次观测时距最近一次发生新降雪间隔天数多达 6~15 天(图 2)。时间越长,积雪老化越明显,导致第二次观测时反照率要低于第一次和第三次观测。特别是第三次观测时,受冷暖气流交汇影响,黑龙江省和吉林省等地区发生了强降雪,从而导致积雪消融期的反照率比稳定期的反照率高,且线路 2 积

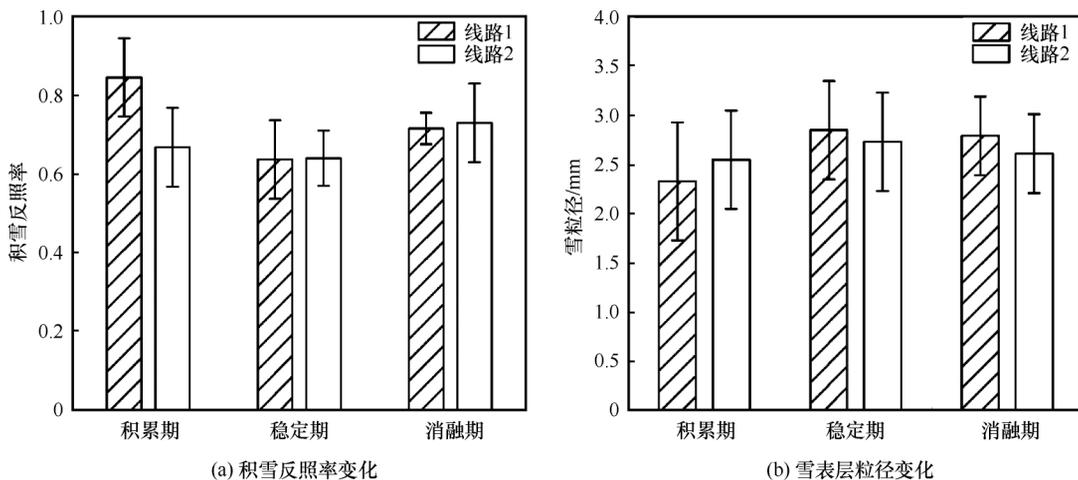


图 4 两条调查线路的积雪反照率与雪表层粒径变化

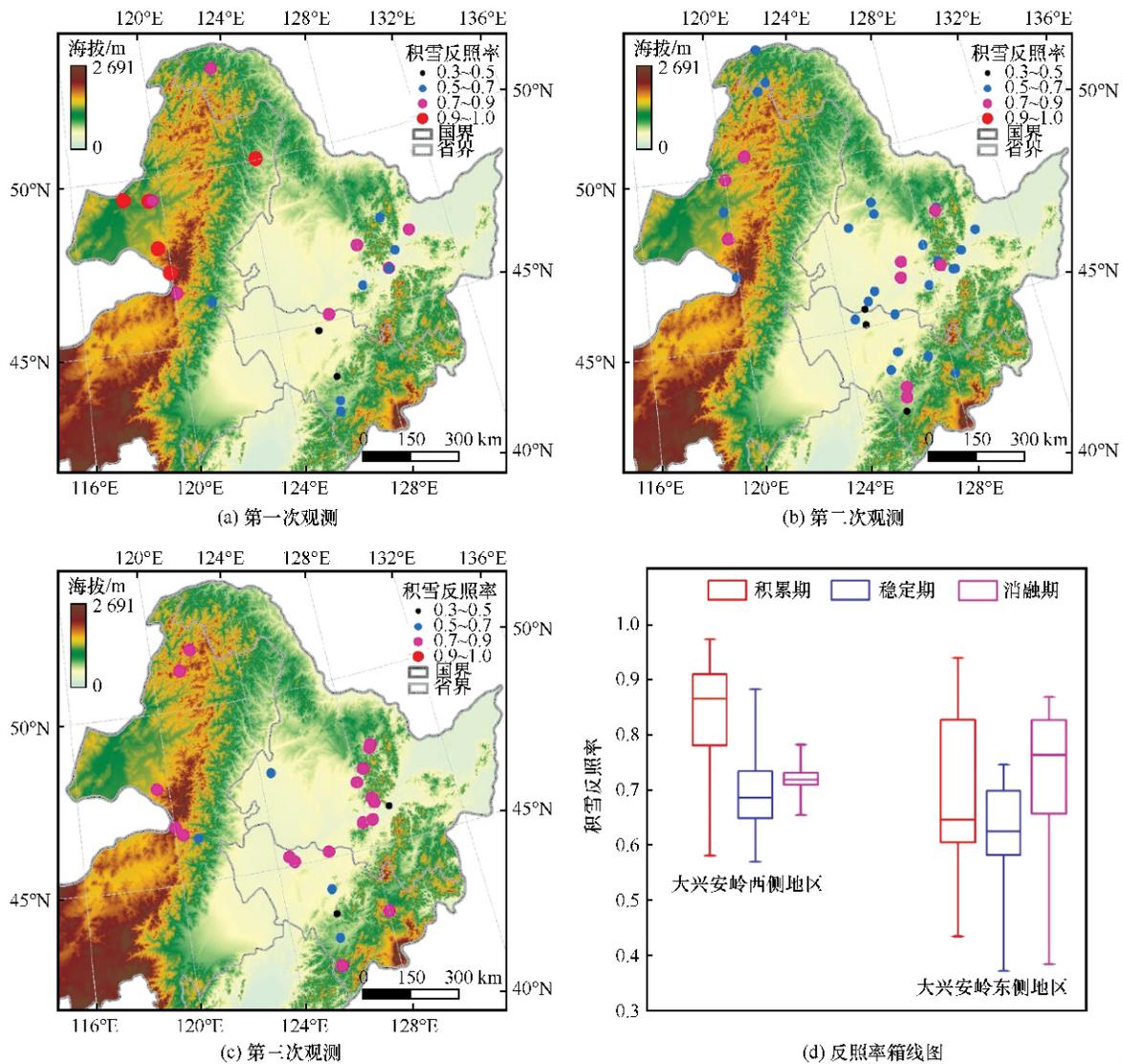
Fig. 4 Albedos (a) and snow surface grain sizes (b) along the survey routes in snow accumulation, stabilization and ablation periods

雪反照率高于线路 1。

3.2 积雪反照率的空间差异

线路 1 观测主要集中在大兴安岭西侧地区，线路 2 观测主要集中在大兴安岭东侧地区，东西两侧地区的积雪反照率差异显著。从第一次观测(积雪积累期)的数据来看，大兴安岭西侧地区积雪反照率均值为 0.834，东侧地区均值为 0.689，均值的标准差均在 0.1 以内，东西两侧地区相差 0.145。大兴安岭西侧地区积雪反照率明显高于东侧地区，西侧地区积雪反照率基本在 0.7 以上，其中部分观测点的值达到了 0.9 以上，而东侧地区积雪反照率值大部分处于 0.3~0.7 之间[图 5(a)]。第二次观测(积雪稳定期)时，大兴安岭西侧地区积雪反照率整

体上大于东侧地区，均值分别为 0.699、0.621，两者相差 0.078，其均值的标准差分别为 0.12、0.09。大部分观测点积雪反照率集中在 0.5~0.7 之间，其中松嫩平原地区积雪反照率较低[图 5(b)]。前两次观测期间大兴安岭西侧地区积雪反照率均高于大兴安岭东侧地区，这主要由于该地区海拔较高，空气温度较低，积雪变质作用较弱^[25]，导致其反照率较大。第三次观测(积雪消融期)时，研究区积雪反照率整体升高，大兴安岭西侧和东侧地区积雪反照率相差较小，均值分别为 0.720、0.726，标准差分别为 0.04、0.13，主要分布在 0.7~0.9 之间[图 5(c)]。通过大兴安岭东西两侧各地区观测点积雪反照率箱线图[图 5(d)]可以看出，大兴安岭西侧地



底图来源：国家测绘地理信息局标准地图服务系统，审图号：GS(2016)2886

图 5 三次观测的积雪反照率值分布

Fig. 5 Distribution of snow albedo observation points in snow accumulation period (a), stabilization period (b) and ablation period (c), and snow albedo box plots in the three periods (d) to the west and the east of the Greater Khingan Range

区积雪反照率值分布较集中,而东侧地区的箱体较长,分布较分散。

以积雪稳定期为例,对大兴安岭东西两侧地区积雪反照率的南北差异进行分析。在大兴安岭西侧地区,随着纬度的增加,积雪反照率总体呈下降趋势,雪表层含水量呈上升趋势[图 6(a)];而在大兴安岭东侧地区,随着纬度的增加,积雪反照率总体呈上升趋势,雪表层含水量呈下降趋势[图 6(b)]。积雪反照率随着雪表层含水量的增加而降低,大兴安岭东西两侧空气湿度的差异是导致积雪

反照率在空间上变化不一致的一个重要原因。总体上,大兴安岭东侧地区空气湿度大于西侧地区,而大兴安岭西侧地区北部的空气湿度又比南部高,大兴安岭东侧地区南部的空气湿度比北部高^[26-27]。在积雪形成过程中,空气湿度很大程度上决定了雪中液态水含量,空气湿度越大,雪中液态水含量越高^[28],这导致了大兴安岭东侧地区北部的雪表层含水量小于南部,积雪反照率呈自南向北升高的趋势;大兴安岭西侧地区北部的雪表层含水量大于南部,积雪反照率呈自南向北降低的趋势。

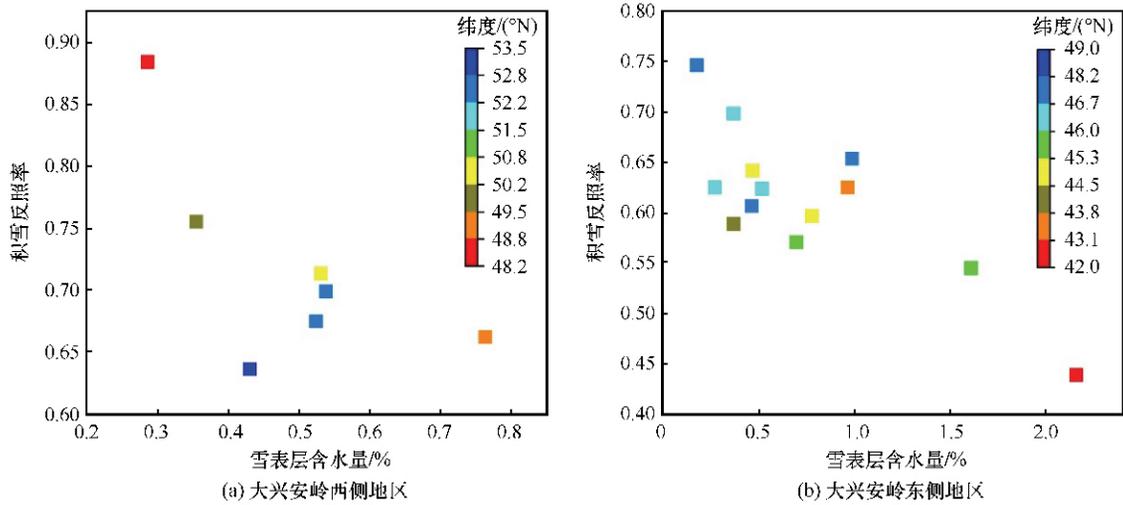


图 6 大兴安岭东西两侧地区积雪反照率与雪表层含水量变化

Fig. 6 Changing of snow albedo with snow surface water content to the west (a) and the east (b) of the Greater Khingan Range

3.3 环境因素对积雪反照率的影响

积雪反照率不仅与积雪本身的物理性质有关,而且受下垫面状态的影响。由于观测点下垫面类型主要为耕地,本文主要对有茬耕地[图 7(a)],有农作物留茬裸露,耕地未完全被积雪覆盖]和无茬耕地[图 7(b)],无农作物留茬裸露,耕地完全被积雪覆盖]这两个类型进行分析。选取样方中的观测点进行详细分析,其地势平坦开阔,下垫面较为单一,以避免受到其他因素干扰。各观测点的详细情况如表 3 所示,其中 1~5 号点观测日期为 2018 年 1 月 22 日,位于 1 km × 1 km 样方; 6~8 号点观测日期为 2018 年 1 月 23 日,位于 2 km × 2 km 样方。1、2 和 3 号点为有茬耕地的情况,积雪反照率均值为 0.596,4、5 号点为无茬耕地的情况,积雪反照率均值为 0.711,相差 0.115; 6、7 和 8 号点也呈类似特点,不同下垫面情况下观测的积雪反照率相差 0.101,可见下垫面的不同状态对积雪反照率影响较大。在有茬耕地上观测时,由于地表不能完全被积雪覆盖,地面反射的辐射能量减少,导致积雪反

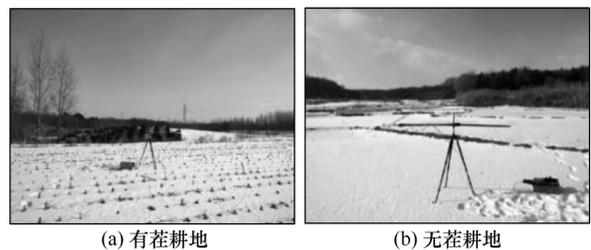


图 7 有茬耕地与无茬耕地示例

Fig. 7 Photos showing the cropland with (a) and without (b) the stubble

照率降低。

此外,在野外观测积雪反照率时,天气易发生变化,这是一个不可控的因素。为了探讨瞬时天气变化对反照率是否存在影响,选取 2018 年 2 月 4 日野外测量的第 4 号点的积雪反照率进行分析。由图 8 可知,上行辐射与下行辐射在 10 min 内发生了 4 次剧烈波动,而积雪反照率仍保持稳定,变化范围在 0.01 以内,标准差为 0.007。在这段时间里天空云量发生了改变,致使太阳直接辐射和雪面的散

表 3 样方观测点信息
Table 3 Information of the observation quadrats

编号	观测日期 (年-月-日)	观测时间	经度 /(°E)	纬度 /(°N)	海拔 /m	下垫面	积雪反照率
1	2018-01-22	11:39 - 11:49	125.372	44.474	185.7	有茬耕地	0.596
2	2018-01-22	12:15 - 12:25	125.372	44.473	183.2	有茬耕地	0.603
3	2018-01-22	14:31 - 14:40	125.374	44.475	186.4	有茬耕地	0.588
4	2018-01-22	12:40 - 12:47	125.372	44.472	183.4	无茬耕地	0.733
5	2018-01-22	14:47 - 15:00	125.372	44.475	187.9	无茬耕地	0.668
6	2018-01-23	11:44 - 11:55	125.633	44.795	204.9	无茬耕地	0.702
7	2018-01-23	10:05 - 10:12	125.626	44.796	206.4	有茬耕地	0.607
8	2018-01-23	13:35 - 13:43	125.624	44.799	199.1	有茬耕地	0.595

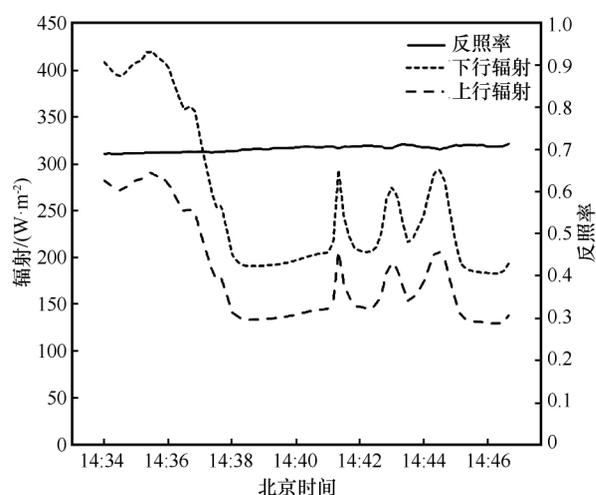


图 8 第 4 号点的上行辐射、下行辐射和反照率的短时变化
Fig. 8 Change of upward radiation, downward radiation and albedo at Point 4 in 10 minutes

射辐射强度发生了变化,但是对反照率影响很小,也一定程度上说明在短时间内天空云量变化对反照率的影响可以忽略。

4 结论

本文分析了在积雪积累期、稳定期、消融期观测的东北地区积雪反照率特性,结果表明:研究区三个不同积雪时期的反照率差异较大,其中积累期的反照率最高,达到 0.745,积雪稳定期和消融期的反照率分别为 0.639、0.725。整体而言,随着雪龄的增加,积雪反照率逐渐降低,但在第三次观测前发生了强降雪,积雪反照率出现升高的现象。积雪反照率在空间分布上也存在差异,大兴安岭东侧地区积雪反照率均值小于大兴安岭西侧地区。大兴安岭东西两侧地区积雪反照率在南北方向上呈相反

的变化趋势,大兴安岭东侧地区北部积雪反照率大于其南部,而在西侧地区,随着纬度增加,积雪反照率呈下降的趋势。耕地上的农作物茬对积雪反照率的影响较大,有茬耕地的积雪反照率低于无茬耕地。在太阳辐射能量剧烈变化的情况下,反照率保持稳定,表明短时间内天气变化对积雪反照率的影响甚微。

本文通过三次野外观测,获得了东北地区的积雪反照率数据集,一方面丰富了该地区的积雪特性资料,另一方面为积雪反照率遥感反演产品的验证提供了重要的数据支撑,对研究区的气候变化研究具有重要意义。

致谢:感谢参加野外工作的中国科学院东北地理与农业生态研究所李晓峰、王广蕊、姜涛、武黎黎、梁爽、李雷、白瑜、范欣桐、万祥坤、赵晓伟,中国科学院西北生态环境资源研究院戴礼云、肖林、苏磊、郭东、任志国、Mika,中国科学院遥感与数字地球研究所李震、乔德京、高硕,国家卫星气象中心郑照军、王圆圆,兰州大学黄晓东、孙燕华,西北大学张宇斌、刘明宇、王阳、张威、刘洁,哈尔滨师范大学张丽娟、潘涛、蒋顺宇、张文帅、杜晨、初征、刘冠之。

参考文献 (References):

- [1] Dickinson R E. Land surfaces processes and climate-surface albedos and energy balance[J]. *Advances in Geophysics*, 1983, 25 (12): 305 - 353.
- [2] Stroeve J, Box J E, Gao F, et al. Accuracy assessment of the MODIS 16-day albedo product for snow: comparisons with Greenland in situ measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94(1): 46 - 60.
- [3] Wang S S, Davidson A. Impact of climate variations on surface albedo of a temperate grassland[J]. *Agricultural & Forest Mete-*

- ology, 2007, 142(2): 133–142.
- [4] Yang F, Mitchell K, Hou Y T, et al. Dependence of land surface albedo on solar zenith angle: observations and model parameterization[J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2007, 47(11): 2963–2982.
- [5] Shi Yafeng, Cheng Guodong. Cryosphere and global change[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 1991, 6(4): 287–291. [施雅风, 程国栋. 冰冻圈与全球变化[J]. *中国科学院院刊*, 1991, 6(4): 287–291.]
- [6] Qin Dahe, Xiao Cunde, Ding Yongjian, et al. Progress on cryospheric studies by international and Chinese communities and perspectives[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(6): 649–654. [秦大河, 效存德, 丁永建, 等. 国际冰冻圈研究动态和我国冰冻圈研究的现状与展望[J]. *应用气象学报*, 2006, 17(6): 649–656.]
- [7] Shi Jiancheng, Xiong C, Jiang L. Review of snow water equivalent microwave remote sensing[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2016, 59(4): 731–745.
- [8] Li Peiji, Mi Desheng. Distribution of snow cover in China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, 5(4): 9–18. [李培基, 米德生. 中国积雪的分布[J]. *冰川冻土*, 1983, 5(4): 9–18.]
- [9] Wang Chenghai, Wang Zhilan, Cui Yang. Snow cover of China during the last 40 years: spatial distribution and interannual variation[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 32(2): 301–310. [王澄海, 王芝兰, 崔洋. 40余年来中国地区季节性积雪的空间分布及年际变化特征[J]. *冰川冻土*, 2009, 32(2): 301–310.]
- [10] Cao Zhi, Fan Haoming. Research on the snow characteristics at different slope position in the low mountain areas in Northeast China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(5): 989–996. [曹志, 范昊明. 我国东北低山区不同坡位积雪特性研究[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(5): 989–996.]
- [11] Jin Cui, Zhang Bai, Liu Dianwei, et al. Retrieval and validation of MODIS subpixel snow fraction in Northeast China[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(2): 195–201. [金翠, 张柏, 刘殿伟, 等. 东北地区 MODIS 亚像元积雪覆盖率反演及验证[J]. *遥感技术与应用*, 2008, 23(2): 195–201.]
- [12] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V, et al. MODIS snow-cover products[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1): 181–194.
- [13] Curry J A, Schramm J L, Ebert E E. Sea ice-albedo climate feedback mechanism[J]. *Journal of Climate*, 1995, 8(2): 240–247.
- [14] Xu Xingkui, Tian Guoliang. Dynamic distribution and albedo change of snow in China[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(3): 178–182. [徐兴奎, 田国良. 中国地表积雪动态分布及反照率的变化[J]. *遥感学报*, 2000, 4(3): 178–182.]
- [15] Cao Meisheng, Li Peiji. Some characteristics of spectral albedo of winter day snow cover in Ürümqi suburb[J]. *Arid Land Geography*, 1991, 14(1): 69–73. [曹梅盛, 李培基. 乌鲁木齐市郊冬季干积雪光谱反照率的若干特征[J]. *干旱区地理*, 1991, 14(1): 69–73.]
- [16] Hao Xiaohua, Wang Jian, Che Tao, et al. The spatial distribution and properties of snow cover in Binggou watershed, Qilian Mountains: measurement and analysis[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(2): 284–292. [郝晓华, 王建, 车涛, 等. 祁连山区冰沟流域积雪分布特征及其属性观测分析[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(2): 284–292.]
- [17] Pan Haizhu, Wang Jian, Li Hongyi. Accuracy validation of the MODIS snow albedo products and estimate of the snow albedo under cloud over the Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 49–57. [潘海珠, 王建, 李弘毅. 祁连山区 MODIS 积雪反照率产品的精度验证及云下积雪反照率估算研究[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 49–57.]
- [18] Wei Zhigang, Lü Shihua. Distribution of snow cover on the Qinghai-Xizang Plateau and its influence on surface albedo[J]. *Plateau Meteorology*, 1995, 14(1): 67–73. [韦志刚, 吕世华. 青藏高原积雪的分布特征及其对地面反照率的影响[J]. *高原气象*, 1995, 14(1): 67–73.]
- [19] Wu Xuejiao, Lu Anxin, Wang Lihong, et al. Spatial and temporal distribution and trend of snow albedo changes in the source region of the Yangtze River in last decade based on MODIS[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(3): 371–377. [吴雪娇, 鲁安新, 王丽红, 等. 基于 MODIS 的长江源近 10 年积雪反照率时空分布及动态变化[J]. *地理科学*, 2013, 33(3): 371–377.]
- [20] Yao Jimin, Gu Lianglei, Zhao Lin, et al. Comparatively observational study of the surface albedo between the permafrost region and the seasonally frozen soil region[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, 71(1): 176–184. [姚济敏, 谷良雷, 赵林, 等. 多年冻土区与季节冻土区地表反照率对比观测研究[J]. *气象学报*, 2013, 71(1): 176–184.]
- [21] Xiao Yao, Zhao Lin, Li Ren, et al. The characteristics of surface albedo in permafrost regions of northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(3): 480–488. [肖瑶, 赵林, 李韧, 等. 藏北高原多年冻土区地表反照率特征分析[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(3): 480–488.]
- [22] Zhang Haijun. Study on spatio-temporal variations of snow from 2000 to 2009 in Northeast China[D]. Changchun: Jinlin University, 2010. [张海军. 2000–2009 年东北地区积雪时空变化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.]
- [23] Hu Ruji. Snow cover and snow disaster prevention in China[M]. Beijing: China Environmental Press, 2013. [胡汝骥. 中国积雪与雪灾防治[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.]
- [24] Jiang Xi. Progress in the research of snow and ice albedo[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 728–738. [蒋熹. 冰雪反照率研究进展[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(5): 728–738.]
- [25] Zhuo Yue, Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi, et al. Spatial distribution and features of snow cover during accumulation period in the middle reaches of Kelan River, Altay region, Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(5): 979–988. [卓越, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 新疆阿勒泰克兰河中游地区冬季积雪分布及特性分析[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(5): 979–988.]
- [26] Zhou Lin. Climate of Northeast China[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991. [周琳. 东北气候[M]. 北京: 气象出版社, 1991.]
- [27] Zheng Hongxing, Liu Jing. Long-term trends of aridity index and its sensitivity to climate factors in Northeast China: 1971–2008[J]. *Geographical Research*, 2011, 30(10): 1765–1774. [郑红星, 刘静. 东北地区近 40 年干燥指数变化趋势及其气候敏感性[J]. *地理研究*, 2011, 30(10): 1765–1774.]
- [28] Xu Jingliang. Study on the influence of non-uniform distribution of snow load on the safety of portal frame[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2016. [徐井良. 非均匀分布雪荷载对门式刚架安全性影响研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2016.]

The characteristics of snow cover albedo in Northeast China

LIU Hao^{1 2 3}, XIAO Pengfeng^{1 2 3}, ZHANG Xueliang^{1 2 3}, FENG Xuezhi^{1 2 3}, YANG Yongke^{1 2 3},
HU Rui^{1 2 3}, ZHANG Zheng^{1 2 3}, SHENG Guangwei^{1 2 3}

(1. Department of Geographical Information Science , School of Geography and Ocean Science , Nanjing University , Nanjing 210023 , China;

2. Key Laboratory for Satellite Mapping Technology and Applications of State Administration of Surveying , Mapping and Geoinformation
of China , Nanjing 210023 , China; 3. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information

Science and Technology , Nanjing 210023 , China)

Abstract: Based on the snow albedo data from 82 observation points from December 2017 to March 2018 in Northeast China , the spatial and temporal characteristics of snow albedo were analyzed from time series difference , spatial characteristics and their impact factors in this paper. The results showed that: (1) temporally , the snow albedo gradually decreased with time with the maximum decline rate of 0.003 d^{-1} . (2) spatially , the snow albedo was significantly different between the west and the east , with an average snow albedo of 0.751 to the west of the Greater Khingan Range , and of 0.679 to the east of the Greater Khingan Range; at the same area , the snow albedo had some differences due to the influences of water content and snow grain; snow albedo to the west of the Greater Khingan Range exhibited low in the north and high in the south , the albedo to the east of the Greater Khingan Range exhibited high in the north and low in the south. (3) the stubble of cropland had a greater effect on snow albedo; the impact of weather change had less effect on snow albedo in a short period of time.

Key words: Northeast China; snow cover; albedo; spatial-temporal differences

(本文编辑: 武俊杰)