

DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2017. 0311

ZHUO Yue ,XIAO Pengfeng ,FENG Xuezhi , et al. Spatial distribution and features of the snow cover during accumulation period in the middle reaches of the 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.]

新疆阿勒泰克兰河中游地区冬季积雪分布及特性分析

卓越^{1 2 3}, 肖鹏峰^{1 2 3}, 冯学智^{1 2 3}, 张学良^{1 2 3}, 杨永可^{1 2 3}, 叶李灶^{1 2 3},
李成蹊^{1 2 3}, 胡 瑞^{1 2 3}, 卞国栋^{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. 南京大学 江苏省地理信息技术重点实验室,江苏 南京 210023;
3. 南京大学 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)

摘 要: 新疆阿勒泰地区是中国季节性积雪水资源最为丰富的地区之一。2016 年 12 月在克兰河中游地区开展了积雪观测,利用直尺和量雪筒测量雪深和雪密度,调查了积雪水资源的分布情况;利用针式温度计测量雪层温度,获取了雪层之间的温度梯度;利用雪特性分析仪和显微镜测量了积雪剖面的雪层密度、液态水含量、介电常数和雪粒径。通过分析研究区积雪水资源的空间分布和积雪特性的垂直分异发现:研究区雪深的分布非常不均匀,北部的雪深总体上大于南部,即使在同一地区,雪深也因风力等原因而分布不均匀;研究区总体上属于“干寒型”积雪,密度较小,且密实化迅速;各雪层属于干雪或者湿度极低的潮雪,绝大多数雪层的液态水含量在 0.3% 以下;积雪温度总体上从表层到底层逐渐升高,表层温度日变化较大;阴天积雪温度高于晴天,各雪层温度日变化小于晴天,且午后积雪会出现负温度梯度,冷中心出现在积雪次表层;雪粒径较小,雪粒长短轴比的最小值出现在中间层,且符合新雪的粒径特点。

关键词: 克兰河中游; 积雪特性; 积雪观测; 雪深; 积雪温度

中图分类号: P468.0⁺25 文献标志码: A 文章编号: 1000-0240(2017)05-0979-10

0 引言

积雪是地表重要的自然资源,是冰冻圈中最活跃的自然要素之一^[1]。积雪因其辐射特性和导热性质与水体、岩土体有着非常显著的差别,对气候自然环境产生巨大影响^[2]。新疆阿勒泰地区是我国季节积雪水资源的主要蕴藏区之一,其积雪融水形成的春汛对农业灌溉有重要意义^[2],是干旱地区农业生存和发展的主要制约因素^[3]。

积雪物理特性包括雪深度、雪密度、雪层温度、液态水含量、介电常数等^[4],这些参数对积雪融水预报、水资源管理、洪水调控和雪崩灾害预报等方面具有重要意义^[5]。雪深是表征积雪气候环境特征与水资源条件的指标之一,是全面研究积雪分布不可缺少的因子^[2]。雪密度是积雪区域水量

平衡研究、融雪径流模拟、雪崩预报和建筑物雪荷载计算等的重要参数^[6]。雪深和雪密度可用于计算雪水当量,是融雪径流模型重要的输入参数^[7]。雪中液态水含量表征了积雪内物质和能量的迁移和交换^[8],影响了雪密度和介电常数的变化,对雪晶发育^[9]、融雪机制、雪崩研究和融雪径流模拟^[10-11]等具有重要意义。雪层温度梯度表征了雪层间的能量传输关系,是推动积雪变质的重要原因之一^[12],是干雪深度研究^[13]、湿雪雪崩^[14]研究中不可忽视的因素。积雪介电常数与液态水含量和雪密度有关,在微波测量中起着关键性作用,决定了不同微波波段下的积雪穿透深度^[15]。

积雪参数的研究主要集中于利用地面观测数据进行统计分析和空间分析,进一步对积雪参数进行时空演变分析,并利用遥感手段对积雪参数进行估

收稿日期: 2017-04-05; 修订日期: 2017-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671344; 41401377) 资助

作者简介: 卓越(1993-),男,湖北安陆人,2015年毕业于湖北师范大学,现为南京大学在读硕士研究生;从事雪深反演研究。

E-mail: zhuoyue_cn@yeah.net

通信作者: 肖鹏峰, E-mail: xiaopf@nju.edu.cn.

算和反演^[16]。利用观测仪器观测积雪参数,分析积雪特性的空间分布特征和积雪剖面垂直变化特征^[14,17],依据积雪特性的空间分布特征对积雪进行分区研究^[18];对比分析不同气象条件、地表覆盖类型、积雪状态下积雪特性的差异与垂直分布特征^[6,19-22],利用多年台站观测积雪参数研究长时间序列积雪特性的变化趋势^[23]。目前对于阿勒泰积雪的研究主要有:利用树轮数据或气象观测资料研究阿勒泰长时间序列冬季降水(雪)的时空变化^[24-27],将阿勒泰市作为阿勒泰地区(含阿勒泰市、布尔津县、富蕴县、福海县、哈巴河县、青河县和吉木乃县)或北疆地区一部分研究积雪参数的空间变化^[28-32]和利用遥感影像和测站数据反演积雪参数^[33-34]。利用遥感技术获取积雪参数需要地面积雪特性同步观测数据的支持,而目前对克兰河中游地区积雪积累期积雪参数的小尺度野外观测和分析还较少。

根据阿勒泰地区的积雪特点,于2016年12月中旬在克兰河中游开展了两次野外积雪观测,利用雪特性分析仪、针式温度计和显微镜等工具测量了研究区雪深、雪密度和积雪剖面上的雪层温度、介电常数、雪层密度、液态水含量、雪粒径,对研究区积雪积累期的积雪空间分布特征和垂直分层特征进行了探讨,并比较了阴天和晴天积雪温度分布、日内变化、变化幅度和空间差异,为研究区域的积雪参数反演提供科学的数据。

1 研究区概况

研究区位于额尔齐斯河支流克兰河的中游地区,阿尔泰山南麓,介于 $87^{\circ}55'13.242'' \sim 88^{\circ}16'30.135'' E$, $47^{\circ}38'26.58'' \sim 47^{\circ}48'37.993'' N$,东西长26.825 km,南北宽18.502 km。北部地区多山地,海拔800 m以上,中部地区较平坦,海拔700~800 m,海拔最低处为西南部,海拔600 m左右,东北部地形较为破碎。

依据Globe Land 30土地覆盖产品^[35],可将研究区划分为耕地、林地、草地、水体、人造地表和裸地。其中,裸地主要为北部和东北部地区的山地、东南和西南部的戈壁,耕地分布在西北部、东部和中部地区,人造地表分布在耕地之间,各种地表覆盖类型面积比例见表1。

研究区纬度较高,且地处亚欧大陆腹地,气候干燥,属于典型的温带大陆性气候。年降水量300~800 mm,最冷月(1月份)平均气温 $-15^{\circ}C$ 以

表1 研究区地表覆盖类型面积比例
Table 1 Proportion of various land covers in the study area

地表覆盖类型	面积比例/%
耕地	47.8
林地	5.9
草地	5.2
水体	3.5
裸地	34.4
人造地表	3.2

上,冬季漫长^[36]。是我国季节性积雪最典型的地区之一,固体降水量占年降水量的三分之一^[36],年平均雪深在40 cm以上。积雪期从10月份开始,到次年3月下旬或4月上旬结束,积雪期长约4~5个月^[37]。积雪比较稳定,年际变化较小,积雪日数的年际变率在0.1以下^[2]。为“干寒型”积雪,雪密度较小,一般为 $0.2 g \cdot cm^{-3}$,小于暖湿地区同粒径积雪的密度^[36]。

2 野外积雪观测方法

本次野外积雪观测的时间为2016年12月中旬,属于积雪积累期,由两次观测组成。第1次观测时间为12月12日-13日,距离最近一次降雪3 d,其中12月12日测量了积雪剖面特性,13日调查了雪深和雪密度的空间分布。第2次观测时间为12月16日-17日,距离最近一次降雪7 d,12月16日和17日上午调查了雪深和雪密度的空间分布,17日下午测量了积雪剖面特性。两次积雪观测都测量了雪深、雪密度、雪层温度和雪层特性(介电常数、雪密度、液态水含量、雪粒径)等各项参数,两次观测点的位置如图1所示。

积雪空间分布主要指雪水当量的空间分布^[14],即雪深和雪密度的空间分布。雪深利用钢制直尺测量,取观测点周围3次测量的平均值,精度为0.1 cm。积雪平均密度采用量雪筒和电子秤称量,经过计算得到,精度为 $1 g \cdot cm^{-3}$ 。

为研究积雪状态的空间分布,测量了各观测点积雪剖面的雪层温度。由于观测时间内,阿勒泰地区的积雪处于冬季积累期,积雪性质在垂直方向上的差异尚不明显,故采用等距离步长的方法将积雪划分为不同的层次进行测量。其他研究人员在观测工作中,采用了5 cm、10 cm和15 cm三种步长^[14,16]。若每5 cm划分为一层,则相邻两层积雪温度在测量过程中相互影响的可能性较大。若每

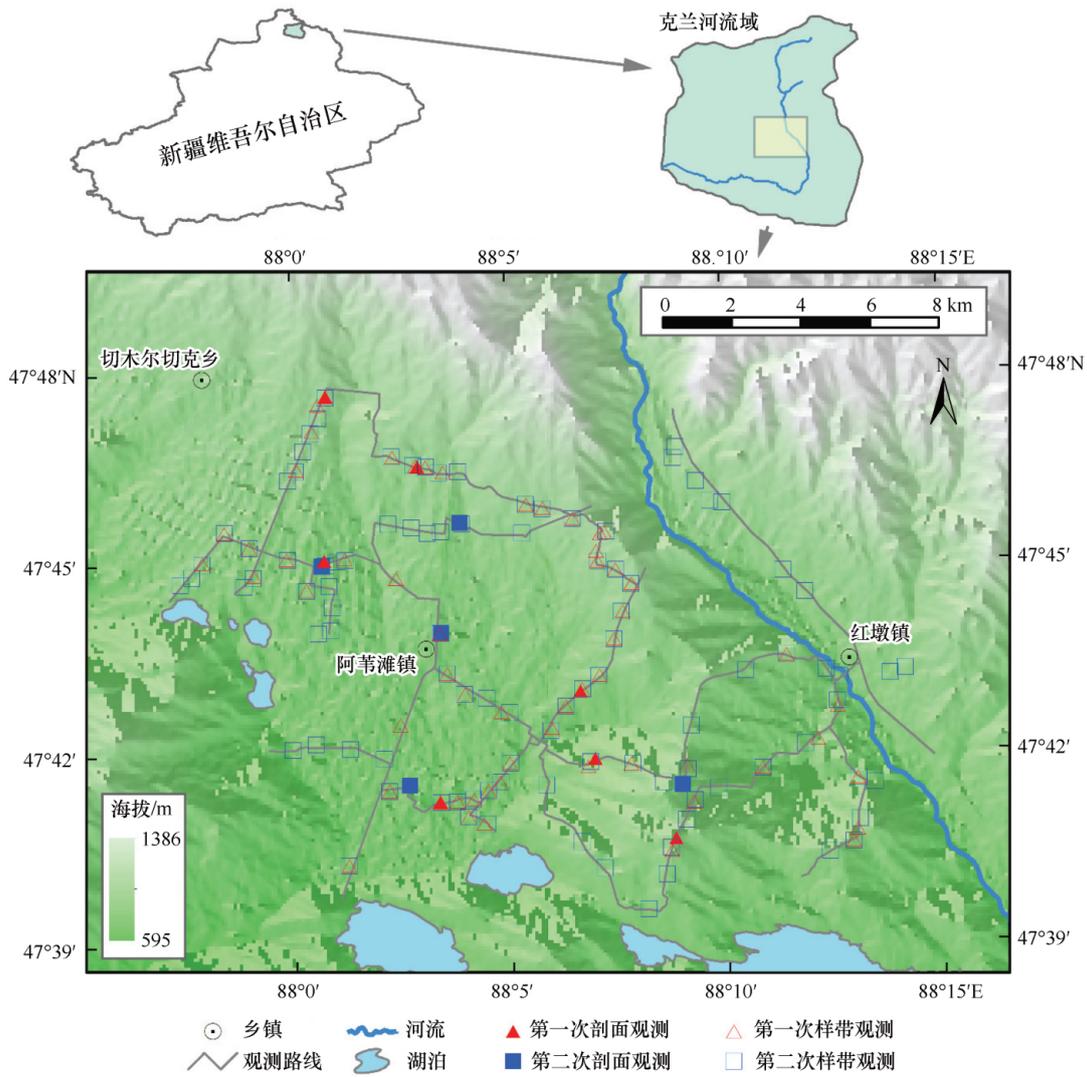


图1 研究区与观测点位置

Fig.1 Location of the study area and position of the measurement points

15 cm 积雪划分为一层进行测量,则测量数据太过稀疏而不能较好地反映出积雪参数垂直方向的变化趋势。在测量过程中,自顶层向下每 10 cm 划分为一层,利用已经标定过的针式温度计对雪层中间的温度进行测量,测量精度为 0.1 °C。积雪温度测量之前,将所有新购置的温度计置入冰水混合物中,待温度稳定后进行读数。利用冰水混合物 0 °C 的特点,对温度计的 0 °C 进行检测和标定。剔除测量误差在 0.1 °C 以上的温度计,观测过程中所用的温度计误差在 0.1 °C 以内。测量不同样带点和剖面点积雪雪层温度时,使用同一批温度计进行测量,直到温度计损坏才使用备用温度计。

为了进一步研究积雪状态的分异,对部分观测点进行了更多参数的剖面测量,测量参数包括雪层密度、介电常数、液态水含量、雪粒径。因为积雪

特性在垂直方向上的变化不大,故采用上述等距离步长的方法,自积雪表层向下,每 10 cm 作为一层进行测量,测量所得积雪参数代表该雪层积雪参数。利用 USB 显微镜获取各雪层的雪粒图像,对雪粒的外接椭圆进行测量,可以获得雪粒长轴和短轴的长度,计算出雪粒的长短轴比 r :

$$r = \frac{A_z}{A_x} = \frac{A_z}{A_y} \tag{1}$$

式中: A_z 为雪粒的长轴长; A_x 和 A_y 为雪粒短轴长,假定 $A_x = A_y$ 。

长短轴比的变化与积雪的状态密切相关^[13],新降雪雪粒为近圆球体, $r \approx 1$; 在重力压实作用下,新雪雪粒近圆球体变为扁椭球体, $r > 1$; 在积雪逐渐老化的过程中,由于垂直温度梯度和水汽的作用,雪粒逐渐变为近圆球体, $r \approx 1$; 再变为长椭球

体, $r > 1$ 。不同雪层的液态水含量(包含质量含水量和体积含水量)、积雪密度、介电常数(包含实部和虚部)由 SnowFork 积雪特性分析仪测量 5 次,取平均值得到。SnowFork 可直接测量积雪的衰减率、共振频率和 3 dB 带宽,计算出积雪的介电常数,并通过经验公式计算出雪密度和液态水含量^[38-40]。SnowFork 在测量和计算积雪参数时,会存在一定误差,液态水含量测量误差标称在 $\pm 0.3\%$ 以下^[41],但研究认为其误差在 $\pm 0.5\%$ 之间^[40]。SnowFork 的雪叉在插入雪层时,对雪体造成了一定的挤压,使雪密度增加了 $1\% \sim 2\%$ ^[42],考虑到其他测量误差,最终雪密度的测量误差为 $\pm 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[41] 或 5% ^[43]。

3 积雪观测数据分析

本次野外积雪观测共获取了两次积雪数据,第 1 次获取了 63 个点的雪深、雪密度和雪层温度数据,7 个点的积雪剖面数据;第 2 次获取了 100 个点的雪深、雪密度和雪层温度数据,5 个点的积雪剖面数据。

3.1 雪深分布特征

第 1 次观测最大雪深 44.6 cm,最小雪深 25.7 cm,平均雪深 36.1 cm;第 2 次观测最大雪深 43.3 cm,最小雪深 12.3 cm,平均雪深 34.7 cm。

雪深在空间上的变化受大气环流的影响和局部地理条件的影响。对观测数据进行空间插值得到雪深空间分布的近似趋势^[44-45]。剔除 1 个因下垫面类型为水体导致的雪深异常点,对余下的雪深观测数据进行空间插值,得到研究区雪深的空间分布

趋势(图 2)。两次观测结果都表明北部的雪深大于南部的雪深,其中雪深最大值出现在西北部的耕地和东北部的山前地带。

阿勒泰地区降水主要受地形和气流的影响^[46]。一方面,来自西南的暖湿气团在东移过程中,气团中水汽不断减少,使得西部地区的降水量多于东部地区的降水量。另一方面,阿尔泰山的走向与西南的暖湿气团成近正交角,地形对气流的抬升作用显著,有利于增加山区降水,使得山麓的降水多于河谷平原地区的降水。郑雷^[17]研究认为,阿尔泰山地区的雪深与海拔有着较好的线性关系,海拔每增加 100 m,平均雪深增加 6.7 cm。在积雪积累期,气温持续低于 0°C ,雪深与降水量有直接关系。此外,积雪的分布还受局部因素影响,如风吹雪现象、地表覆盖类型等。

在 13 日和 16-17 日两次积雪观测中,有 51 对观测点的位置相近,且地形和地表覆盖类型均相同,故相应的雪深值可视为同一处积雪在不同时间的雪深。雪深测量过程中,三次测量取均值的方法在一定程度上消除了局部地形对两次雪深测量的影响。比较两次测量结果发现,78.4% 的观测点的雪深下降了 $0 \sim 10 \text{ cm}$,平均雪深下降了 2.5 cm。相应地,积雪平均密度由第一次观测的 $0.183 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 上升为 $0.199 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。主要原因是随着雪龄的增长,由于风、重力和热变质的作用,积雪平均密度增大,雪深降低。在新降雪发生的 20 d 内,积雪的密实化过程较快,20 d 后密度化过程趋于平缓。

3.2 积雪剖面垂直分布特征

在两次积雪剖面观测中,利用 SnowFork 测量

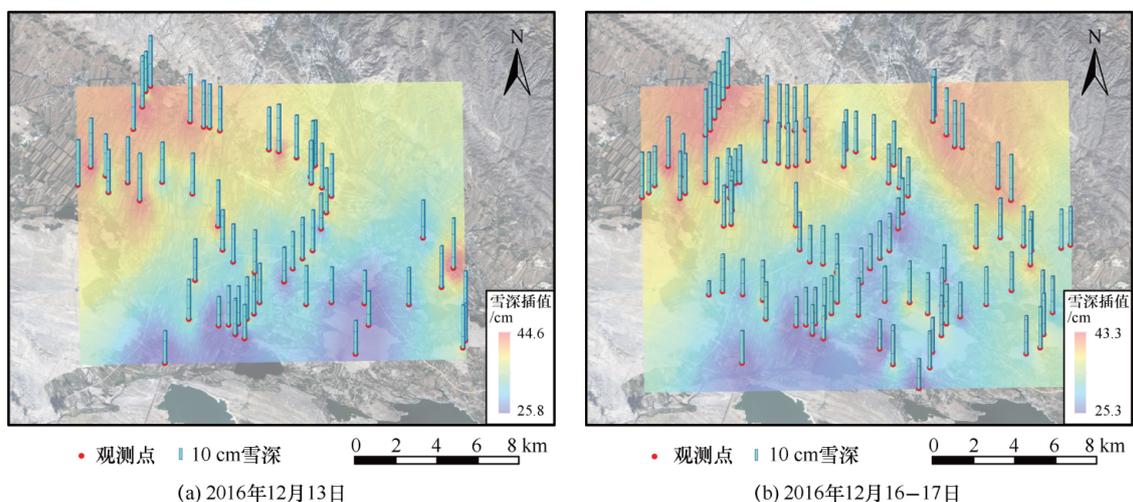


图 2 研究区 12 月 13 日 (a)、16 日和 17 日 (b) 雪深分布

Fig. 2 Spatial distribution of snow depth on December 13 (a), December 16 and December 17 (b)

了 12 个积雪剖面的各雪层密度, 其值分布在 $0.094 \sim 0.258 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 之间, 且存在明显的垂直差异(图 3)。从积雪表层到底层, 雪密度垂直分布形态主要有以下三种: 雪层密度逐渐增加; 雪层密度先增加后减小, 最小积雪密度在表层; 雪层密度先减小后增加, 最小密度在次表面。表层受到的积雪自身的压力较小, 压实作用较小, 而底层的压力较大, 压实作用明显, 这使得雪层密度的分布在总体

上呈现随深度增加而增加的趋势。从积雪表层到底层, 雪龄增加, 压实作用的时间也相应地增加, 这也加大了雪层密度随深度增加而增加的趋势。积雪内部不同雪层之间的温度梯度引起积雪的变质, 推动雪粒形状的变化, 引起雪密度变化。风力作用加大了表层积雪的压实作用, 在某些情况下使得积雪表层的密度略大于底层密度。此外, 积雪的密度也与雪粒形状有关。

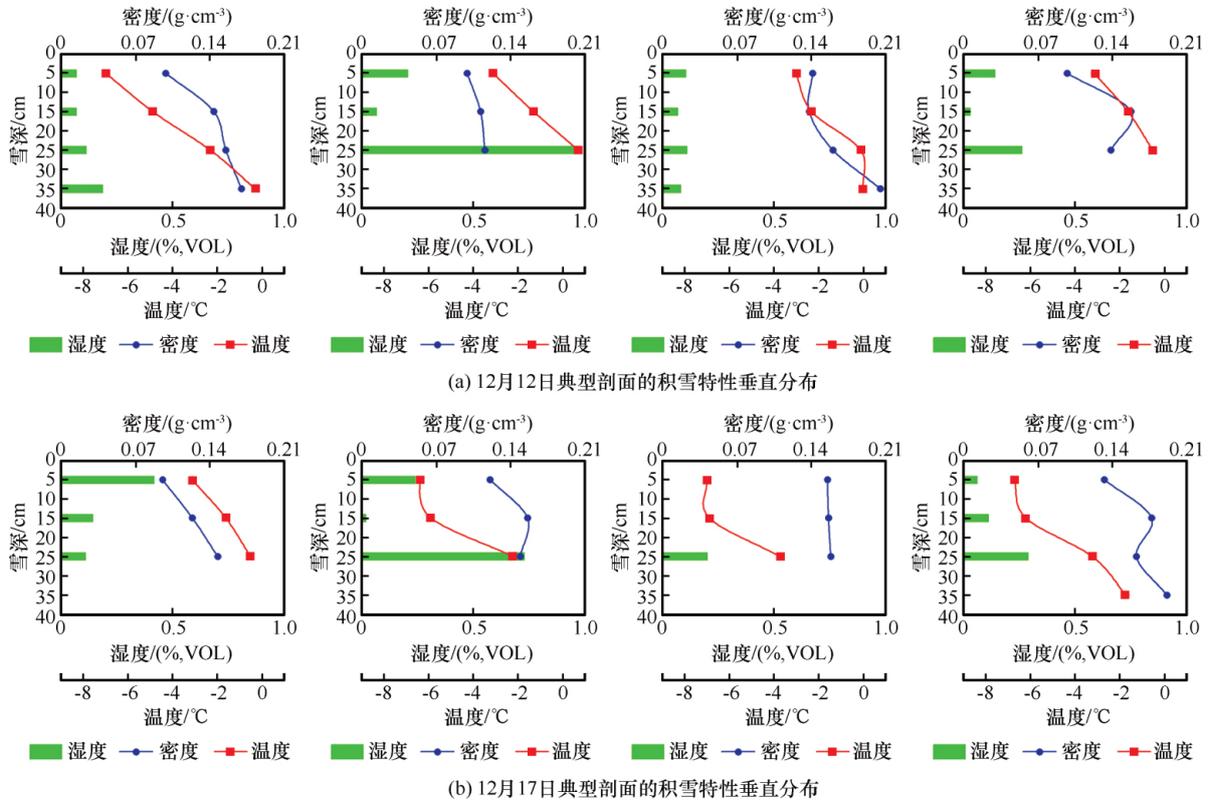


图 3 12 月 12 日 (a) 和 12 月 17 日 (b) 典型剖面的积雪特性垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of snow layer properties of typical profiles on December 12 (a) and December 17 (b)

两次测量的 12 个剖面中, 所有雪层的液态含水量都在 1% 以下, 大多数在 0.3% 以下(图 4)。根据国际水文学协会发布的划分干雪(0%)、潮雪(<3%)、湿雪(3%~8%)、极湿雪(8%~15%)、烂泥(>15%)的标准^[47], 研究区大部分积雪为干雪, 少数积雪为湿度极低的潮雪。总体上, 底层积雪的体积含水量高于表层积雪。雪层含水量的垂直分布表现出较大的差异性(图 3), 少数观测点表层积雪的体积含水量略高于次表层。其原因是雪层自下而上的温度梯度作用, 使得底层雪粒在热量交换的升华和凝华过程中再结晶, 积雪底层的变质作用增加了雪层的含水量。太阳辐射能量和近地面空气温度的日内变化, 使得积雪表层的温度日内变化较大, 这种巨大的温差在一定程度上加剧了积雪的变

质作用, 从而增加了表层积雪的含水量。测量得到雪粒长轴长度在 0.7~1.6 mm 之间,

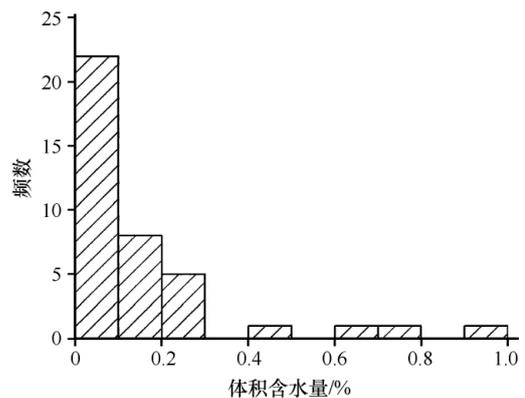


图 4 雪层体积含水量分布

Fig. 4 Histogram of volumetric water content of snow layers

短轴长度在 0.4 ~ 1.1 mm 之间,长短轴比在 1.2 ~ 2.5 之间。图 5 是 12 日和 17 日积雪剖面上不同雪层的雪粒照片,可以看出,雪粒径垂直分异较明显,表层积雪和底层积雪的长短轴比大于中间层。在重力、温度梯度和水汽能量的作用下,积雪发生变质,雪粒的形状随着雪龄由球体变质为扁椭球体,然后变为球体,再变为长椭球体,故表层雪粒和底层雪粒的长短轴比大于中间层。

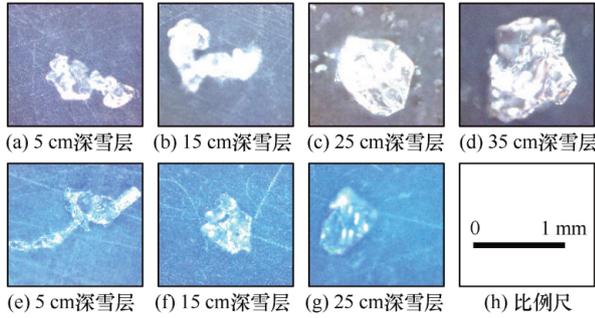


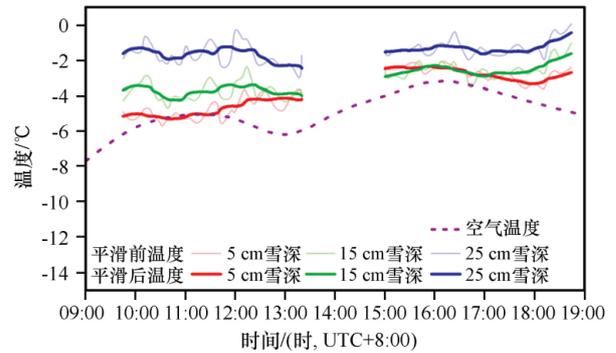
图 5 12 月 12 日 (a, b, c, d) 和 17 日 (e, f, g) 典型剖面的雪粒照片及测量比例尺 (h)
 Fig. 5 Photos of snow particles in typical profiles on December 12 (a, b, c, d) and December 17 (e, f, g) and their scale (h)

3.3 积雪温度特性

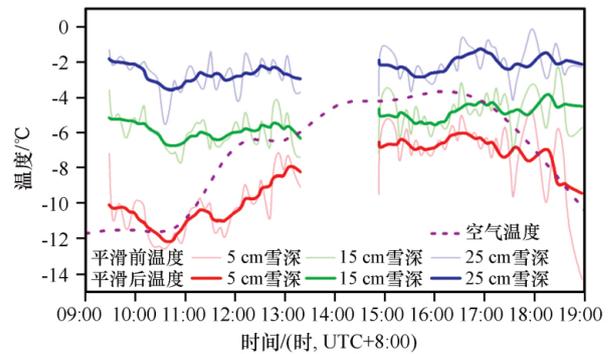
13 日和 16 日分别测量了 63 个点、78 个点的雪层温度数据,大约每 7 分钟测量一个点,得到两个时间序列的雪层温度数据。对两次雪层温度时间序列数据进行均值平滑、插值,可近似得到雪层温度在 1 d 中的变化趋势(图 6)。

由图 6 可见,积雪表层温度较高,而底层温度较低,总体上积雪温度随着雪深的增加而上升。雪层表层温度取决于积雪-空气界面上的太阳辐射、潜热、大气逆辐射和雪面长波辐射等能量交换过程^[48],而积雪底层温度主要取决于积雪-土壤界面下的地中热流过程^[49]。在积雪积累期,空气温度持续低于 0 °C,而下垫面温度在 0 °C 以上,未发生冻结,故积雪表层温度低于底部温度。

积雪表层 10 cm 内温度的日变化较大,而底部温度较为稳定,雪层温度的日变化随雪深的增加而减小。影响积雪温度变化的主导因素随时间的变化而变化,有太阳辐射的时段,太阳辐射对积雪温度的变化起主导作用;无太阳辐射的时段,积雪辐射长波能量和地中热流起主导作用,与太阳辐射相比,能量比较微弱^[21]。太阳辐射能量受太阳高度角变化影响,日变化较大,积雪表层温度变化较大。同时,积雪是热的不良导体,当积雪超过



(a) 12 月 13 日雪层温度日内变化



(b) 12 月 16 日雪层温度日内变化

图 6 12 月 13 日 (a) 和 12 月 16 日 (b) 雪层温度日内变化
 Fig. 6 Hourly variations of snow temperature on December 13 (a) and December 16 (b)

20 cm 时就具有保温作用^[14],所以积雪底部温度日变化较小。积雪各层的最低温度出现在北京时间 10:00 - 11:00,最高温度出现在北京时间 16:00 - 17:00,变化趋势与近地面空气温度较为接近。

数据平滑前,相邻两点时间各雪层温度差异较大,反映了研究区积雪温度空间分布不均匀。雪层温度空间分布不均匀性与时间有关,北京时间 16:00 左右最小,黄昏时最明显。雪层温度空间分布的不均匀性随着积雪深度的增加而减小。16 日 17:00 以后,5 cm、15 cm 和 25 cm 雪深处相邻两点温度最大差值分别为 4.5 °C、3.5 °C 和 2.5 °C,雪层温度方差分别为 7.474 °C、3.138 °C 和 1.785 °C。

观测实验中,13 日为阴天,16 日为晴天。阴天除正午左右一段时间,近地面空气温度高于晴天,积雪各层温度也高于晴天。阴天密集的云层具有保温作用,有效减弱了地面的长波辐射和能量损失,因此阴天早晨近地面空气温度高于晴天;晴天太阳升起后,近地面空气能量来源以太阳辐射为主,升温迅速,于北京时间 16:00 左右达到日最高温,此时近地面空气温度与阴天较为接近;16:00 以后,太阳辐射减弱,近地面空气温度迅速下降,远低于阴天同时间近地面空气温度。因此,阴天积

雪各层温度高于相同时间晴天积雪各层温度, 呈现出先上升后下降的趋势, 而晴天各层积雪温度日变化较大。

与空气相比, 雪吸收能量的能力较低。阴天无直接太阳辐射, 积雪和近地面空气能量的来源以大气逆辐射和地中热流为主, 积雪温度和近地面空气温度日变化较小, 且积雪温度高于近地面空气温度; 晴天积雪和近地面空气以太阳辐射为主, 近地面空气迅速升温, 而积雪温度回升缓慢, 且近地面空气温度在北京时间 11:00 - 17:00 内超过积雪表层温度。

阴天早晨, 由于大气逆辐射对地表能量的补偿作用强于晴天早晨, 因此近地面空气温度高于晴天, 近地面空气温度与土壤温度差异也小于晴天, 故雪层温度梯度小于晴天。阴天北京时间 12:00 以后, 近地面空气温度缓慢回升, 积雪各层温度梯度逐渐减小。晴天北京时间 12:00 以后太阳辐射增强, 近地面空气温度迅速上升, 积雪表层温度也迅速回升, 此时积雪各层温度梯度逐渐减小, 但温度梯度仍大于阴天雪层温度梯度。晴天北京时间 17:00 以后, 太阳辐射减弱, 地表能量损失增加, 积雪温度梯度逐渐增大。阴天北京时间 17:00 以后, 近地面空气温度下降, 积雪长波辐射损失能量增加, 积雪温度梯度逐渐增大, 仍小于晴天积雪温度梯度。因此, 阴天和晴天积雪温度梯度都先减小后增大, 但是阴天积雪温度梯度和温度梯度的日变化都小于晴天。

由于阴天积雪温度高于晴天积雪温度, 且积雪温度梯度较小。在地表温度上升的过程中, 可能出现阴天积雪表层的温度逐渐超过积雪次表层的温度, 出现积雪温度负梯度现象, 使得雪层温度的冷中心出现在积雪的次表层。晴天, 积雪温度梯度较大, 且积雪是热的不良导体, 在地表升温过程中, 积雪温度梯度始终是正梯度, 积雪最低温度始终在积雪表层。

3.4 误差讨论

积雪特性数据的质量受观测工具的系统误差和测量过程中的随机误差影响, 因此对观测误差进行分析有利于评估数据的准确性。首先, 由于地形的分布和河流的切割, 观测点的分布主要集中于中部的耕地和东部的裸地, 东北部山地和西南部戈壁的观测数据缺乏。

其次, 利用雪层厚度和 SnowFork 测量的雪层密度, 可近似计算出积雪剖面上的平均雪密度,

计算公式为:

$$\rho_{\text{snow}} = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^{\text{depth}} \pi r^2 \rho dh}{V} \approx \frac{\sum_{i=1}^n \pi r^2 h_i \rho_i}{\pi r^2 \text{depth}} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i \rho_i}{\text{depth}} \quad (2)$$

式中: ρ_{snow} 为平均雪密度; M 为积雪质量; V 为积雪体积; r 为量雪筒半径; depth 为雪深; i 为雪层; h_i 为雪层厚度。

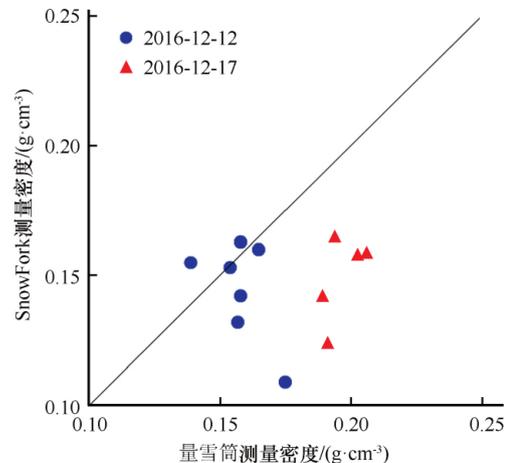


图7 SnowFork 和量雪筒测量雪密度比较

Fig. 7 Comparison of snow density measured by SnowFork and gauge

在积雪剖面观测过程中, 既有利用量雪筒和电子称重法观测的积雪平均密度, 又有利用 SnowFork 测量得到的各层雪密度, 利用式(2)将各层雪密度转换成积雪平均密度并进行比较。从图7可以看出, 利用量雪筒和 SnowFork 测量得到的雪密度在数值上有较大差异, 利用 SnowFork 测量的雪密度值在总体上要低于量雪筒, 说明 SnowFork 的测量数据有一定程度的低估。

最后, 不同雪层中, 雪粒形状分异较大, 用 3~5 个雪粒径测量数值并不能很好地代表雪层的雪粒形状。在雪粒径测量过程中, 雪粒要取出放置在观测平台上, 不能测量出雪粒垂直轴长度、水平轴长度和雪粒在积雪中的排列状况, 故不能通过不同雪层的雪粒径完整地反映雪粒变质的过程。

4 结论

利用积雪观测仪器, 测量了克兰河中游地区 2016 年 12 月中旬积雪的水平和垂直分布特征, 并对观测结果进行了分析。研究表明, 在观测时段内, 研究区雪深空间分布不均一, 存在较明显的空间差异。北部雪深高于南部雪深, 这主要与阿尔泰山西北-东南的走向及研究区北高南低的地形有关。

在积雪积累期,研究区积雪属于干雪或者湿度极低的潮雪,体积含水量垂直分布差异较大。X 或 C 波段微波可以完全穿透积雪层,为利用微波遥感反演积雪参数提供了可能。雪层温度自表层向底层逐渐上升,这主要是由于表层和底层的能量来源和能量交换机制不同。雪层温度梯度存在着较大的日内变化,随着时间推移,表层与底层的温度梯度先减小后增大,这与太阳高度角和近地面空气温度的日内变化有关。此外,雪层温度的垂直分布与天气有关,阴天雪层温度高于晴天,温度梯度和日变化小于晴天,且阴天午后积雪表层的温度可能高于次表层,出现负温度梯度。雪密度分布在 $0.138 \sim 0.232 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,其中第一次观测平均积雪密度为 $0.183 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,第二次观测平均积雪密度为 $0.199 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,主要是积雪的密实化导致了雪密度的变化。雪密度在垂直方向上表现出了较大的分异,主要与不同雪层的密实化时间、积雪变质程度、风力作用等因素有关。观测到的雪粒长轴长在 2 mm 以下,其中大部分粒径较小,无较粗粒雪。雪粒径垂直分异明显,表层和底层的长短轴比较大,而中间层较小,符合新雪的特点和积雪变质的规律。

通过两次野外积雪观测和数据分析,获取了克兰河中游地区 12 月中旬积雪的空间分布特征和垂直分布特性。野外积雪观测获取的数据集,一方面可为积雪参数遥感反演模型提供输入参数,另一方面可为模型提供验证数据。

致谢:感谢中国科学院西北生态环境资源研究院车涛研究员、阿勒泰国家基准气候站刘新民站长、刘大锋副站长以及阿勒泰积雪联合观测研究基地对此次野外观测工作给予的支持和帮助。

参考文献(References):

- [1] Shi Yafeng. Evolution of the cryosphere in the Tibetan Plateau, China, and its relationship with the global change in the mid Quaternary [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(3): 197-208. [施雅风. 第四纪中期青藏高原冰冻圈的演化及其与全球变化的联系 [J]. *冰川冻土*, 1998, 20(3): 197-208.]
- [2] Li Peiji, Mi Desheng. Distribution of snow cover in China [J]. *Journal of Glaciology and Cryopedology*, 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.]
- [3] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (II): Hazards effects [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(6): 1355-1370. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应 (II): 灾害效应 [J]. *冰川冻土*, 2013, 35(6): 1355-1370.]
- [4] Kinar N J, Pomeroy J W. Measurement of the physical properties of the snowpack [J]. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(2): 481-544.
- [5] König M, Winther J G, Isaksson E. Measuring snow and glacier ice properties from satellite [J]. *Reviews of Geophysics*, 2001, 39(1): 1-27.
- [6] Yang Daqing, Zhang Yingsheng, Zhang Zhizhong. A study on the snow density in the head area of Ürtümqi River basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1992, 47(3): 260-266. [杨大庆, 张寅生, 张志忠. 乌鲁木齐河源雪密度观测研究 [J]. *地理学报*, 1992, 47(3): 260-266.]
- [7] DeBeer C M, Pomeroy J W. Simulation of the snowmelt runoff contributing area in a small alpine basin [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(7): 1205-1219.
- [8] Zhao Halin, Zhou Ruilian, Zhao Yue. Advance in snow ecology study in the world [J]. *Advance in Earth sciences*, 2004, 19(2): 296-304. [赵哈林, 周瑞莲, 赵悦. 雪生态学研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2004, 19(2): 296-304.]
- [9] Zhou Shiqiao, Masayoshi Nakawo, Shigemasa Hashimoto, et al. Mathematical modeling of water percolation in snow [J]. *Shuili Xuebao*, 2001, 32(1): 6-11. [周石桥, 中尾正义, 桥本重将, 等. 水在雪中下渗的数学模拟 [J]. *水利学报*, 2001, 32(1): 6-11.]
- [10] Martinec J, Rango A. Parameter values for snowmelt runoff modelling [J]. *Journal of Hydrology*, 1986, 84(3-4): 197-219.
- [11] Sokratov S A. Parameters influencing the recrystallization rate of snow [J]. *Cold regions science and technology*, 2001, 33(2): 263-274.
- [12] Dou Tingfeng, Xiao Cunde, Guo Rui, et al. Analysis on features of snow cover on the Arctic sea ice in summer of 2008 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(1): 43-48. [窦挺峰, 效存德, 郭锐, 等. 2008 年夏季北冰洋海冰表面积雪特征初步分析 [J]. *冰川冻土*, 2012, 34(1): 43-48.]
- [13] Leinss S, Löwe H, Proksch M, et al. Anisotropy of seasonal snow measured by polarimetric phase differences in radar time series [J]. *The Cryosphere Discuss.*, 2015, 9: 6061-6123.
- [14] 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.]
- [15] Rott H, Sturm K, Miller H. Active and passive microwave signatures of Antarctic firn by means of field measurements and satellite data [J]. *Annals of Glaciology*, 1993, 17(1): 337-343.
- [16] Chen Ni, Feng Xuezhi, Xiao Pengfeng, et al. Analysis of snow layer parameters in Manasi River basin [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2015, 51(5): 936-943. [陈妮, 冯学智, 肖鹏峰, 等. 玛纳斯河流域春季雪层参数特性分析 [J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(5): 936-943.]
- [17] Zheng Lei. The temporal-spatial distribution of snow properties in North Xinjiang [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015. [郑雷. 北疆地区积雪时空变化特征 [D]. 兰州: 兰州大学, 2015.]
- [18] Zhang Tingjun, Zhong Xinyue. Classification and regionalization of the seasonal snow cover across the Eurasian Continent [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 481-490. [张廷军, 钟歆玥. 欧亚大陆积雪分布及其类型划分 [J]. *冰川冻土*, 2014, 36(3): 481-490.]

- [19] Huang Weijun, Huang Zhen, Cui Caixia, et al. Temporal and spatial distribution of Xinjiang snow density and its consequence [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(1): 55 - 72. [黄慰军, 黄镇, 崔彩霞, 等. 新疆雪密度时空分布及其影响特征研究[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(1): 55 - 72.]
- [20] Lu Heng, Wei Wenshou, Liu Mingzhe, et al. Spatial and temporal distributions of snow temperature in forest of the western Tianshan Mountains, China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(12): 1541 - 1548. [陆恒, 魏文寿, 刘明哲, 等. 中国天山西部季节性森林积雪雪层温度时空分布特征[J]. *地理科学*, 2011, 31(12): 1541 - 1548.]
- [21] Gao Pei, Wei Wenshou, Liu Mingzhe. Characteristic analysis on temperature change in snow layer in western Tianshan Mountain in China [J]. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(4): 1075 - 1080. [高培, 魏文寿, 刘明哲. 中国西天山季节性积雪热力特征分析[J]. *高原气象*, 2012, 31(4): 1075 - 1080.]
- [22] Zhang Wei, Shen Yongping, He Jianqiao, et al. Snow properties on different underlying surfaces during snow-melting period in the Altay Mountains: observation and analysis [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 491 - 499. [张伟, 沈永平, 贺建桥, 等. 阿尔泰山融雪期不同下垫面积雪特性观测与分析研究[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(3): 491 - 499.]
- [23] Dai Liyun, Che Tao. The spatial-temporal distribution of snow density and its influence factors from 1999 to 2008 in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(5): 861 - 866. [戴礼云, 车涛. 1999 - 2008 年中国地区雪密度的时空分布及其影响特征[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(5): 861 - 866.]
- [24] Li Xiaoshou. Changing characteristics of snowfall in Xinjiang from 1961 to 2010 [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2013. [李效收. 1961 - 2010 年新疆降雪的变化特征[D]. 兰州: 西北师范大学, 2013.]
- [25] Hu Yicheng. Reconstruction and analysis of the dendroclimatology in the middle and east of Altay region [D]. Ürümqi: Xinjiang Normal University, 2011. [胡义成. 阿勒泰地区中东部树木年轮气候重建与分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2011.]
- [26] Hu Yicheng, Wei Wenshou, Yuan Jiang, et al. Reconstruction and analysis of January-February snowfall in the Altay prefecture during 1818 - 2006 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(2): 319 - 327. [胡义成, 魏文寿, 袁玉江, 等. 基于树轮的阿勒泰地区 1818 - 2006 年 1 - 2 月降雪量重建与分析[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(2): 319 - 327.]
- [27] Li Haihua, Liu Dafeng, Li Yang, et al. Variation of snow in altay region in recent 33 years and its relationship with meteorological factors [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2015, 9(5): 29 - 35. [李海花, 刘大锋, 李杨, 等. 近 33 年新疆阿勒泰地区积雪变化特征及其与气象因子的关系[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2015, 9(5): 29 - 35.]
- [28] Hu Liequn, Huang Weijun, Yin Keqin, et al. Estimation of snow water resources and its distribution in Xinjiang [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(3): 326 - 332. [胡列群, 黄慰军, 殷克勤, 等. 新疆冬季雪水资源估算及分布特征[J]. *水科学进展*, 2013, 24(3): 326 - 332.]
- [29] Wang Hongwei, Huang Chunlin, Hao Xiaohua, et al. Analyses of the spatiotemporal variations of snow cover in North Xinjiang [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 508 - 516. [王宏伟, 黄春林, 郝晓华, 等. 北疆地区积雪时空变化的影响因素分析[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(3): 508 - 516.]
- [30] Zhao Yong, Cui Caixia, Li Xia. Climatic characteristics of winter precipitation in north Xinjiang region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 292 - 299. [赵勇, 崔彩霞, 李霞. 北疆冬季降水的气候特征分析[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(2): 292 - 299.]
- [31] Chen Aijing, Huang Haiyun, Zhang Pu, et al. Characteristics analysis of snow parameters in Northern Xinjiang [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2011, 5(4): 5 - 8. [陈爱京, 黄海云, 张璞, 等. 北疆积雪参数特征分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2011, 5(4): 5 - 8.]
- [32] Zhuang Xiaocui, Guo Cheng, Zhao Zhengbo, et al. Snow cover variation analysis in Altay area of Xinjiang [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2010, 28(2): 190 - 197. [庄晓翠, 郭城, 赵正波, 等. 新疆阿勒泰地区积雪变化分析[J]. *干旱气象*, 2010, 28(2): 190 - 197.]
- [33] Lu Xinyu. Snow depth retrieval study based on the passive microwave remote sensing in Northern Xinjiang, China [D]. Ürümqi: Xinjiang Normal University, 2011. [卢新玉. 基于被动微波遥感的北疆地区积雪深度反演[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2011.]
- [34] Hou Xiaogang. Study of snow depth based on multi-source data about Aletai area [D]. Ürümqi: Xinjiang Normal University, 2013. [侯小刚. 基于多源数据的阿勒泰地区积雪深度研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2013.]
- [35] Chen Jun, Chen Jin, Liao Anping, et al. Global land cover mapping at 30 m resolution: a POK-based operational approach [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 103: 7 - 27.
- [36] Hu Ruji, Wei Wenshou. On the zoning of snow damage in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1987, 9(Suppl 1): 1 - 12. [胡汝骥, 魏文寿. 试论中国的雪害区划[J]. *冰川冻土*, 1987, 9(增刊 1): 1 - 12.]
- [37] Zhang Jiahua, Wu Yang, Yao Fengmei, et al. Analyses of recent xinjiang snow cover feature utilizing satellite remote sensing and surface observation data [J]. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(3): 551 - 557. [张佳华, 吴杨, 姚凤梅, 等. 利用卫星遥感和地面实测积雪资料分析近年新疆积雪特征[J]. *高原气象*, 2008, 27(3): 551 - 557.]
- [38] Tiuri M, Sihvola A, Nyfors E, et al. The complex dielectric constant of snow at microwave frequencies [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1984, 9(5): 377 - 382.
- [39] Toikka M. Field tests with the snow fork in determining the density and wetness profiles of a snow pack [J]. *Microwave Signature-92, IGLS-Innsbruck, Austria*, 1992: 1 - 3.
- [40] Sihvola A, Tiuri M. Snow fork for field determination of the density and wetness profiles of a snow pack [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1986(5): 717 - 721.
- [41] Moldestad D A. Characterisation of liquid water content and snow density in a cross-country race ski track [J]. *Bulletin of glaciological research*, 2005, 22: 39 - 49.
- [42] Techel F, Pielmeier C. Point observations of liquid water content in wet snow - investigating methodical, spatial and temporal aspects [J]. *The Cryosphere*, 2011, 5(2): 405 - 418.
- [43] Harper J T, Bradford J H. Snow stratigraphy over a uniform depositional surface: spatial variability and measurement tools [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2003, 37(3): 289 - 298.
- [44] Feng Xuezhi, Bo Yanchen, Shi Zhengtao, et al. Snow depth in north Xinjiang region estimated by Kriging interpolation [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(4): 358 - 361. [冯学智, 柏延臣, 史正涛, 等. 北疆地区积雪深度的克里格内插估计[J]. *冰川冻土*, 2000, 22(4): 358 - 361.]

- [45] Tang Guodong , Ke Changqing. Comparison of spatial interpolation methods of snow depth in the west of China [J]. Remote Sensing Technology and Application , 2007 , 22 (1) : 39 - 44. [唐国栋,柯长青. 中国西部地区积雪深度的空间插值比较 [J]. 遥感技术与应用 , 2007 , 22 (1) : 39 - 44.]
- [46] Wang Jiangang , Liu Dafeng. Analysis of the relationship with precipitation and altitude in the Altay Mountains [C]//Paper compilation of climate change and its mechanisms and simulations of the 26th Chinese Meteorological Society Annual Meeting. Chengdu, 2006: 230 - 234. [王建刚,刘大锋. 阿尔泰山降水与高度关系特征分析 [C]//中国气象学会 2006 年年会——“气候变化及其机理和模拟”分会场论文集. 成都, 2006: 230 - 234.]
- [47] Fierz C , Armstrong R L , Durand Y , et al. The international classification for seasonal snow on the ground [M]. Paris: UNESCO /IHP , 2009.
- [48] Ma Hong , Liu Zongchao. A one-dimensional time-dependent model for dry snow temperature-field simulation [J]. Arid Land Geography , 1991 , 14 (4) : 48 - 55. [马虹,刘宗超. 干寒型积雪一维动态温度场的数学模拟 [J]. 干旱区地理 , 1991 , 14 (4) : 48 - 55.]
- [49] Hu Ruji , Ma Weilin , Wang Cunniu. Avalanhe , in Tianshan Mountains , China , and their control [J]. Journal of Glaciology and Geocryology , 1987 , 9 (Suppl 1) : 13 - 24. [胡汝骥,马维林,王存牛. 中国天山的雪崩及其治理 [J]. 冰川冻土 , 1987 , 9 (增刊 1) : 13 - 24.]

Spatial distribution and features of the snow cover during accumulation period in the middle reaches of the Kelan River , Altay region , Xinjiang

ZHUO Yue^{1 2 3} , XIAO Pengfeng^{1 2 3} , FENG Xuezhi^{1 2 3} , ZHANG Xueliang^{1 2 3} , YANG Yongke^{1 2 3} ,
YE Lizao^{1 2 3} , LI Chengxi^{1 2 3} , BIAN Guodong^{1 2 3} , HU Rui^{1 2 3}

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

Abstract: Altay Prefecture of Xinjiang is one of the regions with abundant seasonal snow water resources in China. The snow properties in the middle reaches of the Kelan River were measured and the spatial and temporal features of them were analyzed. Snow depth and density were measured using snow scales , electronic scale and gauge. Using SnowFork and portable USB-loupe , the snow properties such as permittivity , wetness , density , grain size and temperature were measured in situ. Measurement of snow depth has indicated that the spatial distribution of snow depth in the study area is quite various and the snow depth in north is more than that in south. The water content less than 1% indicate that snow is dry or moist with less liquid water content. The snow density is approximate $0.183 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ on December 13 and $0.199 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ on December 16 , with a fast proceeding of densification. Temperature of snow cover increases generally from surface to bottom and the snow cover often works like a heat insulation layer. Snow temperature at any layers under cloudy is higher than that under sunny , but the diurnal variation of snow cover temperature under cloudy is less than that under sunny. There is lowest temperature in the sub-top of snow after 14:00 under cloudy. The grain size of snow is between fine and coarse , indicating that the snow is fresh.

Key words: middle reaches of the Kelan River; snow properties; measurement of snow cover; snow depth; snow temperature

(本文编辑: 周成林)