

张娟,徐维新,王力,等,2018.三江源腹地玉树地区动态融雪过程及其与气温关系分析[J].高原气象,37(4):936-945.
Zhang Juan, Xu Weixin, Wang Li, et al, 2018. Dynamic snow melting process and its relationship with air temperature in the hinterland of Sanjiangyuna Region in Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Plateau Meteorology, 37(4): 936-945. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2018. 00001.

三江源腹地玉树地区动态融雪过程 及其与气温关系分析

张娟^{1,2}, 徐维新³, 王力¹, 周华坤⁴

(1. 青海省气象科学研究所, 青海 西宁 810001;

2. 青海省防灾减灾重点实验室, 青海 西宁 810001;

3. 成都信息工程大学, 四川 成都 610225;

4. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海省寒区恢复生态学重点实验室, 青海 西宁 810008)

摘要: 利用位于三江源腹地的玉树州隆宝自然保护区野外雪深自动观测站 2013/2014 年冬季每 30 min 积雪深度与同步气温数据, 对发生在 2014 年 2 月的较大降雪过程的动态融雪过程及其同步气温进行了研究分析。结果表明, 玉树隆宝地区融雪过程总体表现为“先慢后快”的变化特征, 积雪在 10 cm 以上时融雪过程相对缓慢, 在 10 cm 以下时, 积雪加速消融, 积雪越薄, 融雪越快; 在融雪期内, 雪深快速下降分别发生在 10:00(北京时, 下同)–11:00 与 14:00–15:30; 气温与雪深变化关系紧密, 09:00 以前, 雪深的下降与气温的关系不明显, 09:00 以后气温开始对雪深的变化产生比较明显地影响, 这种相关性在 10:00 后明显增强, 热量条件对积雪消融的影响自 10:30 一直持续到 18:00; 相对而言, 13:00–14:00 气温对日积雪消融的贡献最大。超前滞后关系分析表明, 融雪期之前 240 min 之内的气温都将显著影响到积雪雪深的变化; 玉树隆宝地区积雪在气温-12℃时仍有积雪深度下降的现象发生, 正变温对积雪消融更有利。

关键词: 三江源; 积雪; 融雪; 气温

文章编号: 1000-0534(2018)04-0936-10 中图分类号: P426. 63⁺3 文献标志码: A

DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2018. 00001

1 引言

积雪是冰冻圈的重要组成部分。对北半球 1978–2010 年时期积雪时空变化的研究结果表明, 近 30 多年来北半球积雪面积整体呈现下降趋势(Li et al, 2012; Liu et al, 2013); 青藏高原是北半球积雪年际变率最为显著的区域之一(胡豪然等, 2013), 近 30 年来青藏高原积雪变化年际波动较大, 总体上没有明显的升降趋势(Tang et al, 2013; Li et al, 2014), 从 10 月至次年 4 月是青藏高原持

续性积雪较多的月份, 其中 2 月持续性积雪面积最大(郭建平等, 2016)。高原东部积雪变化最显著且主导了整个高原积雪的年际变化(王顺久, 2017)。杨志刚等(2017)的研究结果表明, 2000–2014 年 15 年间高原平均积雪面积减少趋势不明显, 高原积雪覆盖率变化趋势的空间差异明显, 青海南部至藏北羌塘高原北部及西南喜马拉雅山脉北麓增加趋势较明显, 其中青海南部覆盖范围最广。高原上的积雪具有不可忽视的作用(周利敏等, 2016), 高原积雪变化引起的融雪径流水资源年际与年内分配变

收稿日期: 2017-08-31; 定稿日期: 2018-01-02

资助项目: 青海省科技厅重点研发与转化项目(2017-SF-131); 国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306054); 国家自然科学基金项目(31560671); 青海省创新平台建设专项(2017-ZJ-Y20)

作者简介: 张娟(1979–), 女, 河北保定人, 高级工程师, 主要从事气候变化及其影响与积雪观测。E-mail: 7845944@qq.com

通信作者: 徐维新(1973–), 男, 青海乐都人, 高级工程师, 主要从事高寒草地生态环境监测评估研究。E-mail: weixin.xu@163.com

化影响区域水资源的重新分配,直接关系到当地和下游人们的生产和生活。另一方面,高原积雪通过改变地表辐射平衡和大气热状况,引起大气环流变化,从而对区域气候产生重要影响(徐兴奎,2011;李栋梁等,2011)。当雪深达到 20 cm 时,积雪具有保温作用(郝晓华等,2009)。积雪带来了洪水、雪崩、雪灾等不利的影 响(Amar et al,2016),雪灾是影响青藏高原经济社会发展最主要的灾害。气温持续偏低,积雪持续积存,易引发雪灾出现,反之,则灾情减轻甚至解除。因此,融雪变化过程的准确判别,是提高雪灾预警能力的关键。积雪面积变化与同期气温之间存在负相关关系,且与最高气温的关系更为密切(杨志刚等,2017);郭玲鹏等(2012)的研究结果表明,气温增加对积雪消融有显著的影响,掌握了气温与积雪消融过程的关系,将有助于预测积雪消融,从而降低雪灾发生的程度。因此,全面准确的了解三江源地区积雪融化特征,对于探究积雪与气温的相互作用、预测雪灾的发生、发展有着重要的意义。

目前,常用于研究的青藏高原积雪资料主要包括卫星遥感资料和地面气象站点观测资料,在气象情报不足,气候恶劣的山区和牧区,卫星遥感资料是唯一能为雪灾分析和气候研究提供雪情信息的手段(郑照军等,2004)。早期研究青藏高原积雪的地面气象资料主要来自于气象站的观测(李小兰等,2012),包括积雪深度、积雪日数以及气温资料(时兴合等,2006),但由于气象台站在空间上存在不连续性和不均匀性的弱点(蔡迪花等,2009),其资料的代表性受到限制。

青藏高原雪灾成灾标准指出,雪灾发生的程度取决于积雪深度和积雪持续时间两个因素。目前传统的雪深测量方法是人工观测法,将量雪尺插入平整雪中至地表面进行地面积雪深度的测量,而积雪持续时间的判断往往限于经验统计的预估方式,由于人工观测雪深比较费时、费力,近几年利用超声波传感器研发了雪深自动探测系统,测量雪深的效果较好(Goodison et al,1988)。在青藏高原三江源地区,由于气象站点有限,地面积雪观测较为不足,且多位于山谷之中,代表性较差,针对积雪消融及其动态过程的研究不足(周扬等,2017b)。本文用超声雪深传感器 SR-50A 在三江源地区腹地开展积雪深度连续动态监测,并对积雪深度变化与同步气温的关系进行初步分析,以期对未来青藏高原

三江源地区地面积雪监测提供参考。

2 资料选取和方法介绍

2.1 研究区概况

研究区域为玉树隆宝积雪监测站(96°36′30″E,33°09′13″N)位于三江源腹地,1986 年 7 月,国务院批准玉树隆宝湿地为国家级黑颈鹤自然核心保护区。隆宝监测站海拔 4 245 m,年平均气温-4℃,年日照时数 2 300 h,多年平均降水量在 414.0~538.6 mm 之间,2011—2015 年夏季降水量略偏少,春、秋、冬季降水量偏多(魏永亮等,2017),每年集中降雪时间为 9 月至翌年 5 月,雪季持续时间较长。选取的隆宝监测站位置开阔,下垫面为典型的高寒草甸地带,具有较好的区域代表性,是研究积雪及其变化过程的理想区域。

2.2 资料选取

2.2.1 雪深观测

采用 Campbell 公司 SR50A 自动雪深测量仪。SR50A 是利用超声波进行测距,通过测量超声波脉冲发射和返回的时间差测得积雪表面与探头之间的距离,从而确定积雪深度。该设备除了具有雪深探测准确度高(识别精度 0.25 mm)、时间分辨率高(分钟级)、适合野外布设等优点外,在寒冷地区具有很高的稳定性。该仪器在国内外已经获得了广泛的应用和验证,数据可靠性较高(Ryan et al,2008;Brazenec,2005)。除多等(2018)的研究结果表明,SR50A 对西藏高原的雪深具有很好的监测能力。

SR50A 架设于玉树州玉树隆宝自然保护区区域自动气象站内。数据采集频率设为每次 30 min,每日可获得 48 个时次的积雪雪深监测数据。野外监测数据自 2013 年 9 月 1 日至 2014 年 5 月 24 日,所测的积雪深度数据质量较好,原始观测数据序列如图 1 所示。

2.2.2 气温观测

气温数据采用同一个气象区域自动站温度传感器所测得数据,与雪深监测数据保持相同频次。该温度传感器与雪深传感器安装在同一高度,与雪深传感器探头相距 1 m 内,视为两个传感器处于同一外界环境条件下。该温度传感器由江苏省无线电科学研究所有限公司生产的 ZKZ-B 气温监测探头,精度为 0.1℃,采样周期为每次 30 min。本研究气温数据序列选取与积雪深度监测数据相同步的

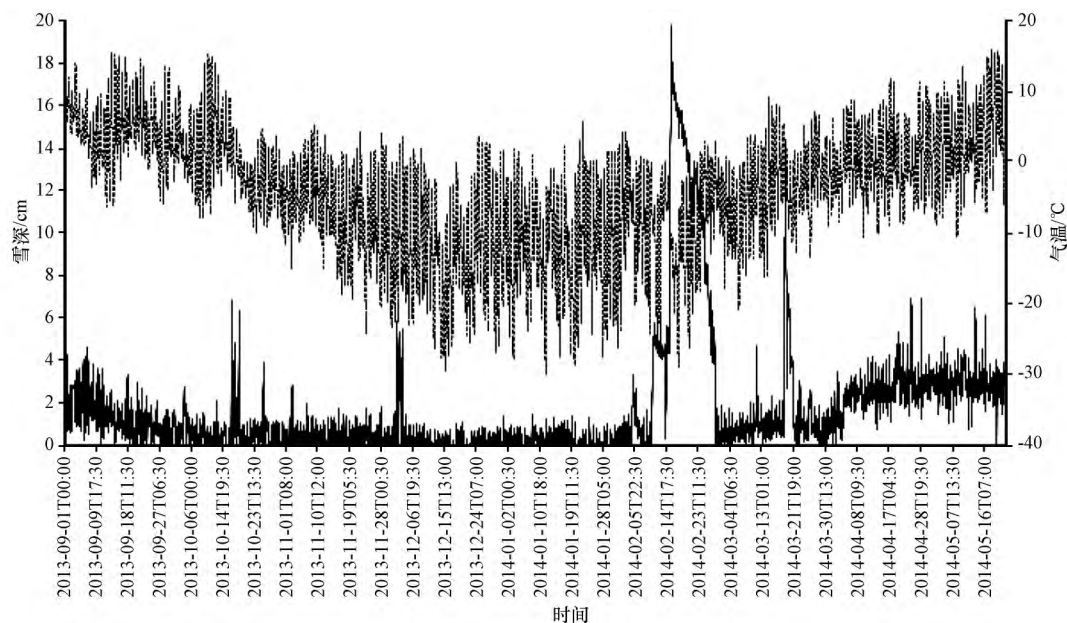


图1 2013年9月1日至2014年5月24日玉树隆宝每30 min 积雪深度与同步气温观测序列

Fig. 1 The sequence of every 30 minutes snow depth and temperature observations in Longbao of Yushu from 1 September 2013 to 24 May 2014

2013年9月1日至2014年5月24日每30 min 观测值。

2.3 方法介绍

2.3.1 数据质量控制

由于雪深传感器较为敏感,存在仪器本身的稳定性与外界人为干扰等因素,原始数据序列需要进行检验与质量控制。质控发现,雪深数值存在明显的波动。经对现场仪器设备和观测状态的检查后发现,观测仪器即使在无雪情况下也会有观测值的波动和跳跃,而这种假数据的跳动与观测场下垫面草地牧草修剪状况、风的吹动、太阳辐射、异物(如草、动物、垃圾)移入移出有关。从图1中可以看出,在无雪期时,原始雪深数据在2 cm 以下震荡。因此可以认为,本数据序列存在2 cm 的假观测值。由于这种假观测值所造成的误差是一种系统误差,所以在分析过程中剔除了小于2 cm 的雪深。

2.3.2 线性相关

通过计算 Pearson 线性相关系数,进行融雪与气温相关关系分析。同时考虑气温与积雪消融过程对时间响应的滞后性,相关系数的计算设置为4 h 滞后。

3 结果与分析

3.1 降雪过程

从图1中还可以看出,在2013年9月1日至

2014年5月24日共出现3次降雪天气过程,第一次自2014年2月中旬开始出现降雪过程,在3月上旬积雪完全消融,整个积雪过程持续了17天,其中降雪持续了3天,融雪过程持续了14天;第二次3月下旬开始出现降雪,但在3天内消融;第三次自4月中旬开始直至5月下旬,积雪过程较长,但最大积雪深度为4 cm,且积雪维持过程,出现多次重叠降雪过程,降雪、融雪相互交织,雪深曲线表现为“累积-消融-累积-消融”形态。

从三次降雪过程变化特征看,第一次积雪时间较长且积雪深度相对较深,适于融雪动态连续过程分析,第二、三次积雪时间较短或降雪与融雪过程多次重叠,不利于融雪过程的分析。因此,本文以2014年2月13日至3月1日出现的第一次降雪、融雪过程分析为主。

从2014年2月15日至3月1日30 min 雪深化化曲线(图2)中可以看出,2月15日出现降雪天气过程,直至3月1日积雪过程结束。在整个降雪过程中,雪深处于积累阶段,2月17日07:00(北京时间,下同)累积积雪深度达到最大值为19 cm,之后积雪开始慢慢消融,进入持续融雪时段,至3月1日积雪完全消融。整个降雪过程持续了17天,其中降雪持续了3天,融雪过程持续了14天。

图3为2014年2月16日至3月2日玉树隆宝

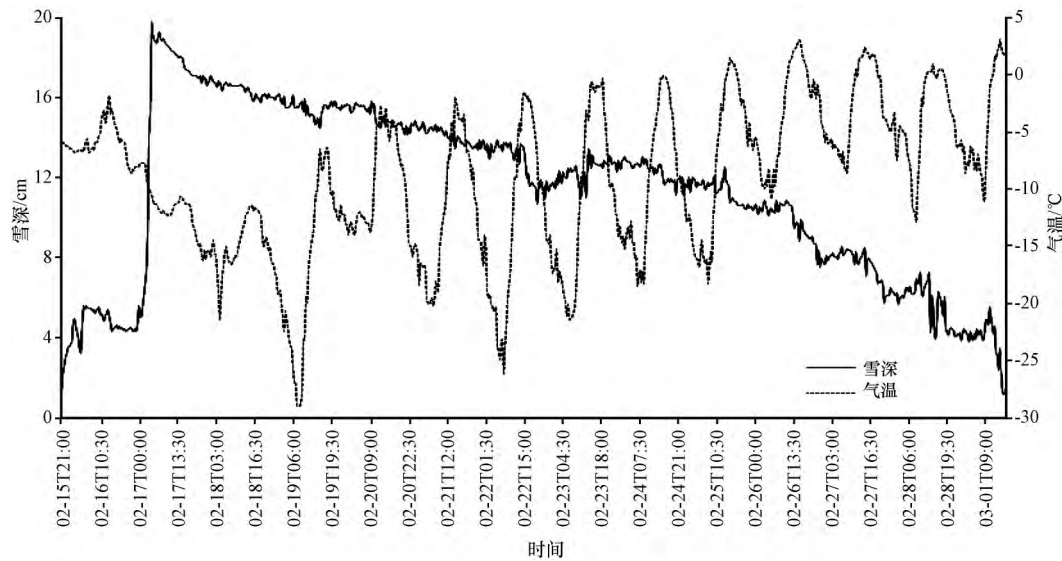


图2 2014年2月15日至3月1日玉树隆宝每30 min 积雪深度及同步气温观测序列

Fig. 2 The sequence of the observed snow depth every 30 minutes and synchronize temperature in Longbao of Yushu from 15 February to 1 March 2014

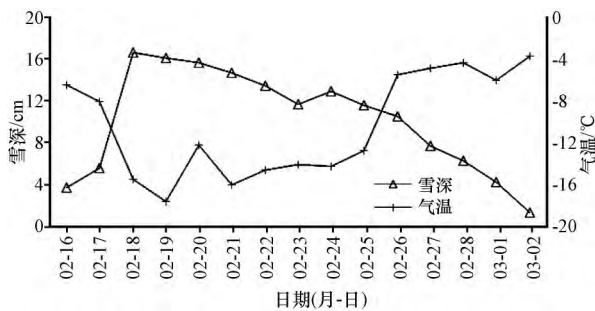


图3 2014年2月16日至3月2日玉树隆宝每日00:00 雪深数据与气温数据序列

Fig. 3 Daily snow depth sequence with synchronized temperature at 00:00 in Longbao of Yushu area from 16 February to 2 March 2014

试验站每日00:00雪深曲线与同步气温数据序列。从图3中可以看出,总体雪深呈现“先升后降”而气温呈现“先降后升”的变化趋势。自2月15日出现降雪天气过程后,积雪深度开始积累,气温同步下降,18日雪深达到最大值16.56 cm,降雪天气过程结束,随后19日雪深下降,进入融雪时段,气温回升。3月2日积雪全部消融,积雪过程结束。

“降雪-积累-融化”整个过程中,雪深与同步气温曲线表现为相反的变化特征,即:随着气温的持续上升,雪深不断下降,直至完全融化;从融雪过程中可以看出,融雪总体上表现为“先慢后快”的变化特征,积雪在10 cm以上时,融雪相对缓慢,

积雪在10 cm以下时,融雪迅速,积雪越薄,融雪越快。

3.2 融雪过程日变化特征

将2月17日至3月1日融雪过程每日00:00—24:00的30 min雪深、气温数据进行平均,得到00:00—24:00 30 min的雪深、气温平均值即为日变化。气温呈现单峰变化趋势,08:00左右气温开始上升,在15:00左右达到峰值,而后开始下降至最低值;雪深总体呈现“平稳-下降-平稳”的变化趋势,10:00前雪深处于相对平稳变化趋势,而后随着气温的上升,积雪开始融化,雪深下降,21:00左右雪深开始处于相对平稳的变化趋势。隆宝地区10:00—19:00为积雪消融时段,积雪消融持续时间约为9 h。雪深快速下降阶段分别出现在10:00—11:00及14:00—15:30[图4(a)]。

从同步气温与雪深曲线[图4(a)]可以发现,在积雪消融时段内,气温最高值为 -2°C ,最低值为 -12°C ,积雪在气温零度以下仍有雪深下降现象发生。在10:00以前和20:00以后的弱消融期内,雪深与气温的变化幅度很小。在10:00—19:00融雪时段,当气温在 -12°C 时,对应时段雪深出现下降过程。气温自08:30出现上升趋势,气温的积累对10:00以后的积雪消融存在一定的贡献,因此积雪消融与气温之间可能存在超前滞后关系。

将前一时次雪深减去后一时次雪深得到逐时次雪深变化量 ΔS_d ,对雪深变化量 ΔS_d 进行误差订

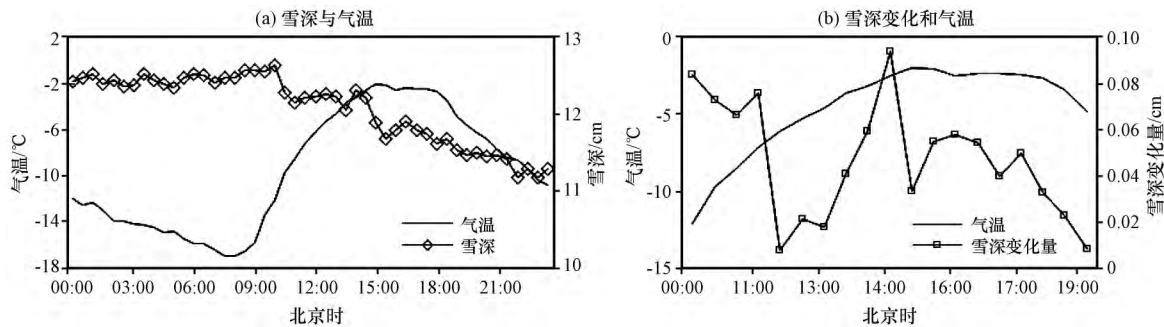


图 4 玉树隆宝地区典型融雪期多日平均每 30 min 雪深与气温(a)及 10:00—19:00 雪深变化量与气温变化特征(b)
 Fig. 4 The change feature of several days on average every 30 minutes snow depth and air temperature (a), 10:00—19:30 of snow depth and temperature(b) during typical snow melting period in Longbao of Yushu area

正,剔除非正常值,得到 10:00—19:00 雪深变化量与气温变化特征[图 4(b)]。从图 4(b)中可以看出,10:00—19:00 融雪阶段内,气温先升后降,融雪深度呈现波动变化趋势。在快速融雪阶段,14:00—14:30 之间融雪深度为 0.09 cm,其次 10:00—10:30 之间融雪深度最大为 0.08 cm。

从融雪开始时期 2 月 18 日至积雪完全消融 28

日的逐日雪深动态变化过程容易发现(图 5),进入融雪期后,日积雪消融总体呈现下降趋势,但在不同积雪深度条件下积雪消融特征存在明显差别。当积雪深度在 10 cm 以上时,日积雪消融速度较为缓慢,积雪深度在 10 cm 以下时,日积雪消融速度迅速,日消融量随着积雪的缓慢消融而逐渐增大,直至完全消融。

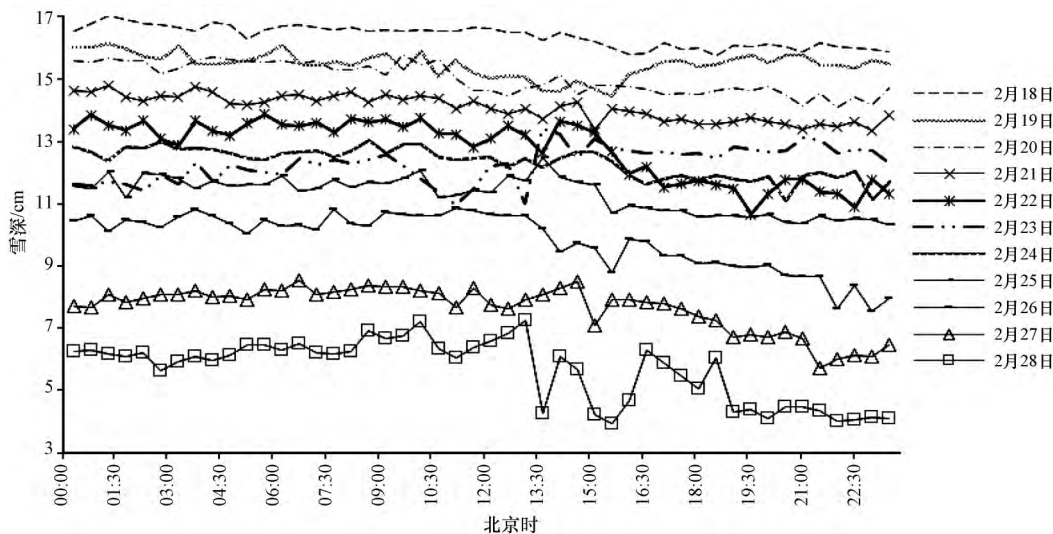


图 5 玉树隆宝地区典型融雪期逐日 30 min 雪深变化特征

Fig. 5 The change feature of daily 30 minutes of snow depth during typical snow melting period in Longbao of Yushu area

3.3 雪深与气温关系

3.3.1 雪深与气温相关分析

由于积雪消融与气温的关系可能存在滞后效应,在分析气温与雪深相关关系时,这种超前滞后性必须加以考虑。玉树地区冬季日平均温度一般低于 0 °C,夜间由于气温低、无日照,可以假设雪深不因温度变化而变化,即雪深的变化特别是与气温相关的变化主要发生在白天。依据中国气象局颁发的《地面气象观测规范》(中国气象局,2003),玉树

地区 2 月中下旬至 3 月初每日的日出时间为 06:26—06:41,日落时间为 17:52—18:05。因此,本研究假定日出之后的气温均有可能对雪深变化产生影响,在计算气温与雪深相关系数时,气温数据选取 06:00—18:00,并逐一计算自 06:00 起至当前时刻每 30 min 观测气温与当前雪深 Pearson 相关系数,以考察雪深变化与同步及超前时段气温的滞后相关关系。雪深与同步及超前气温相关系数见表 1 所列。

表 1 融雪期逐 30 min 雪深与同步及超前至 06:00 气温相关系数
Table 1 Correlation coefficient of every 30 minutes snow depth sequence and synchronized and advanced temperature to 06:00 during snow melting

T/Sd	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00
06:00	-0.53	-0.54	-0.51	-0.53	-0.49	-0.51	-0.50	-0.52	-0.49	-0.51	-0.54	-0.56	-0.56	-0.57	-0.56	-0.55	-0.54	-0.47	-0.48	-0.50
06:30	-0.55	-0.56	-0.53	-0.55	-0.50	-0.53	-0.52	-0.54	-0.53	-0.52	-0.56	-0.58	-0.58	-0.59	-0.58	-0.57	-0.57	-0.47	-0.48	-0.49
07:00	-0.53	-0.54	-0.51	-0.53	-0.49	-0.51	-0.50	-0.52	-0.50	-0.52	-0.54	-0.56	-0.56	-0.57	-0.56	-0.55	-0.54	-0.48	-0.49	-0.50
07:30	-0.49	-0.50	-0.46	-0.50	-0.44	-0.46	-0.46	-0.48	-0.48	-0.51	-0.49	-0.52	-0.51	-0.52	-0.51	-0.51	-0.52	-0.42	-0.43	-0.44
08:00	-0.43	-0.44	-0.40	-0.44	-0.38	-0.41	-0.39	-0.42	-0.44	-0.40	-0.42	-0.46	-0.45	-0.46	-0.44	-0.43	-0.44	-0.39	-0.39	-0.41
08:30	-0.43	-0.44	-0.40	-0.44	-0.38	-0.41	-0.39	-0.41	-0.43	-0.40	-0.40	-0.45	-0.44	-0.45	-0.44	-0.43	-0.44	-0.41	-0.41	-0.42
09:00		-0.57	-0.54	-0.57	-0.52	-0.54	-0.53	-0.55	-0.56	-0.53	-0.54	-0.58	-0.57	-0.58	-0.57	-0.56	-0.56	-0.53	-0.54	-0.54
09:30			-0.66	-0.68	-0.64	-0.65	-0.64	-0.67	-0.68	-0.65	-0.65	-0.70	-0.68	-0.69	-0.68	-0.67	-0.67	-0.64	-0.64	-0.65
10:00				-0.75	-0.72	-0.73	-0.72	-0.73	-0.74	-0.72	-0.71	-0.75	-0.74	-0.74	-0.73	-0.73	-0.73	-0.72	-0.72	-0.73
10:30					-0.80	-0.81	-0.80	-0.82	-0.82	-0.80	-0.79	-0.83	-0.82	-0.82	-0.82	-0.81	-0.80	-0.82	-0.82	-0.83
11:00						-0.81	-0.80	-0.81	-0.81	-0.79	-0.76	-0.80	-0.80	-0.78	-0.78	-0.78	-0.79	-0.81	-0.81	-0.81
11:30							-0.80	-0.82	-0.81	-0.79	-0.77	-0.81	-0.80	-0.79	-0.79	-0.79	-0.79	-0.83	-0.83	-0.83
12:00								-0.85	-0.84	-0.82	-0.80	-0.84	-0.83	-0.82	-0.82	-0.82	-0.82	-0.86	-0.85	-0.85
12:30									-0.83	-0.81	-0.78	-0.82	-0.81	-0.80	-0.79	-0.79	-0.79	-0.83	-0.83	-0.83
13:00										-0.86	-0.81	-0.84	-0.84	-0.82	-0.82	-0.83	-0.83	-0.88	-0.88	-0.87
13:30											-0.80	-0.84	-0.83	-0.82	-0.82	-0.82	-0.83	-0.89	-0.88	-0.88
14:00												-0.85	-0.85	-0.82	-0.83	-0.83	-0.83	-0.88	-0.87	-0.87
14:30													-0.81	-0.78	-0.79	-0.80	-0.80	-0.88	-0.87	-0.86
15:00														-0.73	-0.74	-0.74	-0.75	-0.84	-0.83	-0.82
15:30															-0.76	-0.76	-0.76	-0.86	-0.84	-0.84
16:00																-0.77	-0.77	-0.87	-0.85	-0.85
16:30																	-0.75	-0.87	-0.85	-0.85
17:00																		-0.88	-0.86	-0.85
17:30																			-0.87	-0.86
18:00																				-0.85

相关系数 $R < -0.80$, 通过 0.001 显著性水平检验; $-0.80 < R < -0.68$, 通过 0.01 显著性水平检验; $-0.68 < R < -0.55$, 通过 0.05 显著性水平检验

由表 1 中可以看出, 气温与雪深均呈现明显负相关关系, 表明随着气温上升, 积雪消融现象明显。总体来看, 07:30—08:30 的气温对雪深的影响不大, 随着太阳升起, 09:00 的气温对雪深的影响开始增大, 通过 0.05 的显著性检验水平, 10:00 以后气温对雪深的影响开始逐渐显著, 通过 0.01 的显著性检验水平, 13:00—14:00 的气温对雪深贡献最大, 通过 0.001 的显著性检验水平。从相关系数看出, 10:00—18:00 雪深与 10:00—18:00 的气温具有显著相关关系, 13:00—18:00 的雪深与 13:00—14:00 的气温相关关系更显著, 表明热量条件与积雪深度变化存在直接联系。

从相关显著性在不同时段气温的响应水平上看, 雪深变化与气温的关系存在一个非常清楚的现象, 即 09:00 以后气温开始对雪深的变化产生比较明显地影响, 这种相关性在 10:00 后明显增强。10:30 以后的气温与其后雪深的相关显著性大多通过了 0.01 的显著性水平。这说明, 玉树地区每日 09:00 以前, 雪深的下降与气温的关系不明显, 自 09:00 以后, 热量条件才对积雪的消融产生较明显影响作用。热量条件对积雪消融的影响自 10:30 后明显增强达到显著水平, 且可以一直持续到 18:00。

从通过 0.05 显著性水平检验的相关系数来看, 14:00 雪深与 06:00 气温具有相关关系, 即超前

480 min的气温将对积雪深度的变化有影响。从通过 0.01 显著性水平检验的相关系数来看,13:00—13:30 的雪深与 10:00—12:30 的气温相关性显著,15:00—16:30 的雪深与 10:00—16:30 的气温相关性显著。从通过 0.001 的显著性水平检验的相关系数来看,10:30—11:00 的气温与同步及超前 30 min 的雪深具有显著性关系,12:00—12:30 的雪深与 10:30—12:30 的气温相关性显著,雪深与同步及超前 90 min 的气温相关最为显著,14:00—14:30 雪深与 10:30—14:30 的气温相关性显著,雪深与同步及超前 210 min 的气温相关最为显著,17:00—18:00 雪深与 11:30—18:00 的气温相关性显著,雪深与同步及超前 330 min 的气温相关最为显著。

从雪深对气温变化响应敏感的关系看,12:00—12:30,14:00—14:30 和 17:00—18:00 是雪深变化对气温响应敏感的时段;从主要融雪时段(10:00—18:00)雪深与气温关系分析看,融雪期雪深变化与前期 240 min 的气温均具有显著相关关系,即融雪期之前 240 min 之内的气温都将显著影响到积雪雪深的变化。

3.3.2 雪温关系模式

为进一步探讨雪深与气温的关系,选取主要融雪时段 10:00—18:00 每 30 min 平均雪深及气温数据,分别对雪深及其同步和超前 30~300 min 气温建立线性拟合方程分析发现,雪深与超前 240 min 气温线性关系最好,于是进一步给出了融雪期雪深及其超前 240 min 气温散点分布(图 6)。

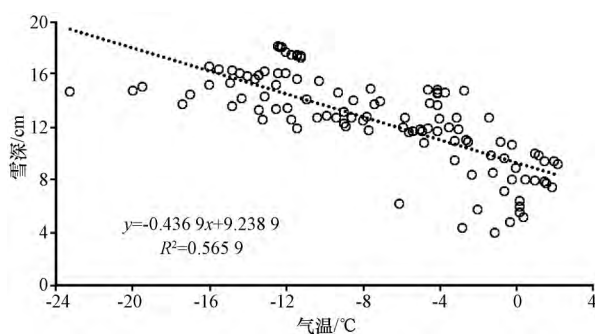


图 6 融雪期雪深及其超前 240 min 气温散点分布

Fig. 6 The scatter chart of snow depth and its advanced 240 minutes temperature during snow melting

从图 6 中可以看出,雪深与气温总体呈线性关系,相关性较好,相关系数为 0.75,在 0.01 的水平上显著相关。当积雪厚度在 7 cm 以下时,积雪深度与气温线性关系减弱。玉树隆宝地区气温对雪

深的影响主要发生在 $-15 \sim -2$ °C 之间,2, -4 及 -12 °C 是雪深下降的主要温度临界值。

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 积雪消融对气温、时间响应的区域差异性

周扬等(2017a)的研究结果表明,沱沱河地区积雪消融在 -13 °C 时发生,在 $-4 \sim -2$ °C 为该区积雪消融的主要温度区间;玛多地区 2013/2014 年冬季 $-12 \sim -8$ °C 是主要的积雪响应敏感区域,2014/2015 年冬季 $-10 \sim -4$ °C 是主要的积雪响应敏感区域;而玉树隆宝地区,积雪消融在 -12 °C 时发生,2, -4 及 -12 °C 是积雪消融的主要温度临界值,不同地区对积雪消融的主要气温临界值存在差异性。

周扬等(2017a)发现沱沱河雪深与其超前 30 min 的气温具有显著响应关系,玛多地区(周扬等,2017b)两次冬季融雪发生之前 3 h 之内的气温都将显著影响到积雪雪深变化,融雪幅度主要决定于超前半小时和当时的温度条件,隆宝地区超前 240 min 的气温显著影响积雪深度的变化;隆宝地区雪深快速下降阶段分别出现在 10:00—11:00 与 14:00—15:30,沱沱河地区则出现在 12:00—13:30 与 16:30—18:00,隆宝地区明显超前沱沱河地区。不同地区雪深对气温响应的敏感时段也存在明显的区域差异性。

4.1.2 正变温对积雪消融更有利

利用融雪期气温与降雪量各时次的平均值,将前一时次雪深减去后一时次雪深得到逐时次雪深变化量 ΔS_d ,后一时次气温减去前一时次气温得到逐时次气温变化量 ΔT_a ,即可得到融雪期 30 min 变温与雪深变化量的平均日变化特征(图 7)。从图 7 中可以看出,08:00 之前气温为负变化且在 0 °C 以下,此刻没有雪深下降现象发生,08:00 以后,气温为正变化且变温突破 0 °C,08:00—09:00 之间,虽然气温上升,但是由于雪深下降与气温之间存在滞后关系,09:00 以后雪深才出现下降现象,09:00—10:30 为增温最大的时段,这一增温时段与雪深变化量较大时段相对应,之后,气温增幅缓慢。13:00—14:30 为雪深下降最大时段,此时的增温并不是最大时段,但此时增温仍为正变化,此后,变温出现负值变化。由此,融雪过程的发生与大于 0 °C 变温过程关系密切,升温的变化过程与积雪消融紧密,正变温对积雪消融更有利。

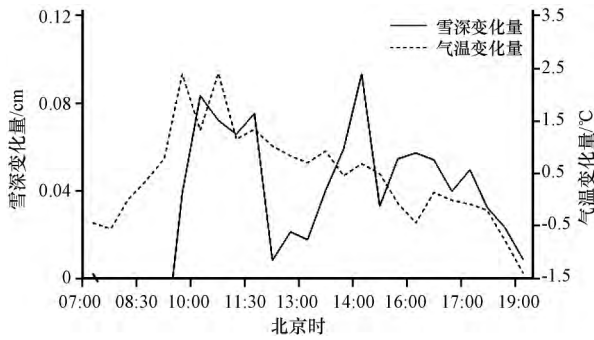


图7 玉树隆宝地区融雪期 30 min 变温(ΔTa)与雪深变化量(ΔSd)的平均日变化特征

Fig. 7 The average diurnal variation of every 30 minutes temperature (ΔTa) and snow depth variation (ΔSd) during snow melting stage in Longbao of Yushu area

4.2 结论

利用青藏高原腹地玉树隆宝地区野外观测试验站 2014 年冬季每 30 min 积雪深度和同步气温,对发生在 2 月中下旬的积雪动态融雪过程及其与气温的关系进行了分析,得到如下主要结论:

(1) 玉树隆宝地区的融雪过程表现为“先慢后快”的变化特征,积雪在 10 cm 以上时,融雪相对缓慢,积雪在 10 cm 以下时,融雪迅速,积雪越薄,融雪越快。10:00—19:00 为积雪消融的主要时段,雪深快速下降阶段分别出现在 10:00—11:00 和 14:00—15:30。

(2) 气温与雪深变化关系紧密,09:00 以前,雪深的下降与气温的关系不明显,09:00 以后气温开始对雪深的变化产生比较明显地影响,这种相关性在 10:00 后明显增强。10:30 以后的气温与其后雪深的相关显著性大多通过了 0.01 的显著性水平,热量条件对积雪消融的影响自 10:30 后明显增强达到显著水平,且可以一直持续到 18:00;相对而言,13:00—14:00 气温对日积雪消融的贡献最大。

(3) 超前滞后关系分析表明,积雪雪深开始出现下降之前 480 min 的气温可能影响到积雪的变化;从雪深对气温变化响应敏感的关系看,融雪期雪深变化与前期 240 min 的气温均具有显著相关关系,即融雪期之前 240 min 之内的气温都将显著影响到积雪雪深的变化。

(4) 玉树隆宝地区积雪在气温 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时仍有下降现象发生,当积雪厚度在 7 cm 以下时,积雪深度与气温线性关系减弱。与不同地区的研究结果对比表明,积雪消融对气温、时间响应存在一定的区

域差异性;升温的变化过程与积雪消融紧密,正变温对积雪消融更有利。

参考文献 (References):

- Amar N P, Roop P, 2016. Design and implementation of a novel automated snow depth sensing system [J]. *Journal of Sensors and Instrumentation*, 4(1): 1–18. DOI: 10.7726/jsi.2016.1001.
- Brazenec W A, 2005. Evaluation of ultrasonic snow depth sensors for automated surface observing systems (ASOS) [D]. department of forest, rangeland, and watershed steward. M. S. Thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO, 134.
- Goodison B E, Metcalfe J R, Wilson R A, et al, 1988. The Canadian automatic snow depth sensor: A performance update [C]//*Atmos Environ Serv*, 178–181.
- Li H, Tang Z, Wang J, et al, 2014. Synthesis method for simulating snow distribution utilizing remotely sensed data for the Tibetan Plateau [J]. *J Appl Remote Sens*, 8(1): 084696–1–16.
- Li Z, Liu J, Tian B, 2012. Spatial and temporal series analysis of snow cover extent and snow water equivalent for satellite passive microwave data in the northern hemisphere (1978–2010) [C]//*IEEE Int Geosci Remote Sens Sym*, 4871–4874.
- Liu J, Li Z, 2013. Temporal series analysis of snow water equivalent of satellite passive microwave data in northern seasonal snow classes (1978–2010) [C]//*IEEE Int Geosci Remote Sens Sym*, 3606–3609.
- Ryan W A, Doesken N J, Fassnacht S R, 2008. Evaluation of ultra-sonic snow depth sensors for us snow measurements [J]. *J Atmos Ocean Technol*, 25(5): 667–684.
- Tang Z, Wang J, Li H, 2013. Monitoring snow cover changes and their relationships with temperature over the Tibetan Plateau using MODIS data [C]//*IEEE Int Geosci Remote Sens Sym*, 1178–1181.
- 蔡迪花, 郭铤, 王兴, 等, 2009. 基于 MODIS 的祁连山区积雪时空变化特征 [J]. *冰川冻土*, 31(6): 1028–1036. Cai D H, Guo N, Wang X, et al, 2009. The spatial and temporal variations of snow cover over the Qilian Mountains based on MODIS Data [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 31(6): 1028–1036.
- 除多, 边巴次仁, 扎珠, 等, 2018. SR-50A 超声雪深仪在西藏高原的适用性研究 [J]. *高原气象*, 37(2): 382–393. Chu D, Bianba C R, Zha Z, et al, 2018. Applicability study of SR-50A ultrasonic snow depth sensor for snow measurement in Tibetan Plateau [J]. *Plateau Meteor*, 37(2): 382–393. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00037.
- 郭建平, 刘欢, 安林昌, 等, 2016. 2001–2012 年青藏高原积雪覆盖率变化及地形影响 [J]. *高原气象*, 35(1): 24–33. Guo J P, Liu H, An L C, et al, 2016. Study on variation of snow cover and its orographic impact over Qinghai-Xizang Plateau during 2001–2012 [J]. *Plateau Meteor*, 35(1): 24–33. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00140.
- 郭玲鹏, 李兰海, 徐俊荣, 等, 2012. 天山巩乃斯河谷积雪深度及季节冻土温度对气温变化的响应 [J]. *资源科学*, 34(4): 636–

643. Guo L P, Li L H, Xu J R, et al, 2012. Responses of snow depth and seasonal frozen ground temperature to enhanced air temperature in Kunges valley Tianshan Mountains [J]. *Res Sci*, 34(4): 636-643.
- 郝晓华, 王建, 车涛, 2009. 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*, 31(2): 284-292. Hao X H, Wang J, Che T, 2009. The spatial distribution and properties of snow cover in Binggou Watershed, Qilian Mountains: Measurement and analysis [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 31(2): 284-292.
- 胡豪然, 梁玲, 2013. 近 50 年青藏高原东部冬季积雪的时空变化特征 [J]. *地理学报*, 68(11): 1493-1503. Hu H R, Liang L, 2013. Spatial and temporal variations of winter snow over east of Qinghai-Tibet Plateau in the last 50 years [J]. *Institute of Plateau Meteorology*, 68(11): 1493-1503.
- 李栋梁, 王春学, 2011. 积雪分布及其对中国气候影响的研究进展 [J]. *大气科学学报*, 34(5): 627-636. Li D L, Wang C X, 2011. Research progress of snow cover and its influence on China Climate [J]. *Trans Atmos Sci*, 34(5): 627-636.
- 李小兰, 张飞民, 王澄海, 2012. 中国地区地面观测积雪深度和遥感雪深资料的对比分析 [J]. *冰川冻土*, 34(4): 755-764. Li X L, Zhang F M, Wang C H, 2012. Comparison and analysis of snow depth over China, observed and derived from remote sensing [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 34(4): 755-764.
- 时兴合, 李凤霞, 扎西才让, 2006. 1961—2004 年青海积雪及雪灾变化 [J]. *应用气象学报*, 17(3): 376-382. Shi X H, Li F X, Zhaxi C R, et al, 2006. The variation of snow-cover and snow disaster in Qinghai during 1961—2004 [J]. *J Appl Meteor Sci*, 17(3): 376-382.
- 王顺久, 2017. 青藏高原积雪变化及其对中国水资源系统影响研究进展 [J]. *高原气象*, 36(5): 1153-1164. Wang S J, 2017. Progresses in variability of snow cover over the Qinghai-Tibetan Plateau and its impact on water resources in China [J]. *Plateau Meteorology*, 36(5): 1153-1164. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00117.
- 魏永亮, 韩方昕, 解文璇, 2017. 玉树地区 1961—2015 年降水变化特征分析 [J]. *中国农学通报*, 33(4): 124-130. Wei Y L, Han F X, Xie W X, 2017. Precipitation variation characteristics in Yushu in 1960—2015 [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 33(4): 124-130.
- 徐兴奎, 2011. 1970—2000 年中国降雪量变化和区域性分布特征 [J]. *冰川冻土*, 33(3): 497-503. Xu X K, 2011. Spatiotemporal variation and regional distribution characteristics of snowfall in China from 1970 to 2000 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 33(3): 497-503.
- 杨志刚, 达娃, 除多, 等, 2017. 近 15a 青藏高原积雪覆盖时空变化分析 [J]. *遥感技术与应用*, 32(1): 27-36. Yang Z G, Da W, Chu D, et al, 2017. Spatiotemporal variations of snow cover on the Tibetan Plateau over the Last 15 years [J]. *Remote Sens Technol Appl*, 32(1): 27-36.
- 郑照军, 刘玉洁, 张炳川, 2004. 中国地区冬季积雪遥感监测方法改进 [J]. *应用气象学报*, 15(增刊): 75-84. Zhen Z J, Liu Y J, Zhang B C, 2004. Improved remote sense monitoring on snow cover of China in Winter [J]. *J Appl Meteor Sci*, 15(Suppl): 75-84.
- 中国气象局, 2003. 地面气象观测规范 [Z]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2003. Specifications for surface meteorological observation [Z]. Beijing: Meteorological Press.
- 周利敏, 陈海山, 彭丽霞, 等, 2016. 青藏高原冬春雪深年际变化与南亚高压可能联系 [J]. *高原气象*, 35(1): 13-23. Zhou L M, Chen H S, Peng L X, et al, 2016. Possible connection between interdecadal variations of snow depth in winter and spring over Qinghai-Xizang Plateau and South Asia High in summer [J]. *Plateau Meteorology*, 35(1): 13-23. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00152.
- 周扬, 徐维新, 白爱娟, 等, 2017a. 青藏高原沱沱河地区动态融雪过程及其与气温关系分析 [J]. *高原气象*, 36(1): 24-32. Zhou Y, Xu W X, Bai A J, et al, 2017a. Dynamic snow-melting process and its relationship with air temperature in Tuotuohe. Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 36(1): 24-32. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00013.
- 周扬, 徐维新, 张娟, 等, 2017b. 2013—2015 年青藏高原玛多地区两次动态融雪过程及其与气温关系对比分析 [J]. *自然资源学报*, 32(1): 101-113. Zhou Y, Xu W X, Zhang J, et al, 2017b. A comparative analysis of the two dynamic snow-melting process and their relationship with air temperature during 2013—2015 in the area of Maduo, Tibetan Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 32(1): 101-113.

Dynamic Snow Melting Process and Its Relationship with Air Temperature in the Hinterland of Sanjiangyuan Region in Qinghai-Tibetan Plateau

ZHANG Juan^{1,2}, XU Weixin³, WANG Li¹, ZHOU Huakun⁴

(1. Meteorological Institute of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China;

2. Laboratory of Disaster Prevention and Reduction of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China;

3. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, Sichuan, China;

4. laboratory of cold recovery ecology of Qinghai province, Northwest Plateau Institute of biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, Qinghai, China)

Abstract: The data of 30 mins snow depth and air temperature in winter half year during 2013 to 2014 derived from the field automatic observing site in the hinterland of the Sanjiangyuan Region in Qinghai-Tibetan Plateau were used in this study. We mainly analyzed the relationship between snow depth and air temperature in the time level of half hour based on one long snow melting period with 16 days in this area from 21 February to 1 March in 2014. The melting process of snow in this area is characterized by slow first and fast later. It was found that snow melting is slow while snow depth above on 10 cm, but it was changed obviously when snow depth is less than 10 cm and snow depth melting will more remarkable along with more low snow depth. During the snowmelt period, the snow depth drops rapidly at 10:00 (Beijing time, the same as after) -11:00 and 14:00 - 15:30. In this area, the relationship between snow depth and air temperature show a weak correlation before 9:00, the correlation becomes obvious after 9:00 and it is gradually stronger after 10:00 until 18:00. The time from 13:00 to 14:00 is a main period contribute to snow melt in a day. The advance lag analysis showed that the temperature within 240 mins before the melting period would significantly influence the change of snow depth. We found that the decrease of snow depth can be observed even though at $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ in this area.

Key words: Sanjiangyuan; snow; snow melting; temperature