

引用格式:段永超,孟凡浩,刘铁,等.昆仑山提孜那甫河流域雨雪分离的温度条件分析[J].地球信息科学学报,2017,19(12):1661-1669. [Duan Y C, Meng F H, Liu T, et al. 2017. Analysis of temperature conditions for rain and snow separation in Tizinafu River Basin of Kunlun Mountains. Journal of Geo-information Science, 19(12):1661-1669.] DOI: 10.3724/SP.J.1047.2017.01661

昆仑山提孜那甫河流域雨雪分离的温度条件分析

段永超^{1,2}, 孟凡浩^{1,2}, 刘铁^{1*}, 罗敏^{1,2}, 张军峰¹, 包安明¹

1. 中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

Analysis of Temperature Conditions for Rain and Snow Separation in Tizinafu River Basin of Kunlun Mountains

DUAN Yongchao^{1,2}, MENG Fanhao^{1,2}, LIU Tie^{1*}, LUO Min^{1,2}, ZHANG Junfeng¹ and BAO Anming¹

1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Under the context of global climate change, the heavy flood caused by the snow melting (glacier melting) as well as heavy rainfall in the high altitude mountainous areas in Xinjiang Uygur Autonomous Region was becoming more unpredictable. Therefore, clarifying the relationship between the temperature and the rainfall types is the prerequisite step to predict the flood effectively in these mountainous regions. Fortunately, the approach of rainfall and snowfall separation in mountainous regions is capable of determining the temperature conditions which may cause the heavy flood. It is also able to provide important and scientific references to the accurately prediction for the heavy flood in the mountainous regions. In this study, temperature and precipitation data were collected from ground-based meteorological stations located in different altitude in a case study area: the Tizinafu River Basin in Kunlun Mountains. This study was conducted on a daily basis during 2012 to 2016. The MODIS10A2 snow cover data with 8-day temporal resolution were also applied as the valid reference data. For the purpose of rainfall and snow separation, we adopted the temperature integral and probability statistics methods to analyze the temperature conditions for different rainfall types in the research region. The remote sensing snow cover data combined with the average temperature over the latest past few years are used to determine the different temperature conditions with different precipitation patterns. The results were summarized as follows. If the maximum temperature and accumulated temperature reaches 20.91 °C and 51.82 °C, respectively, the precipitation can be predicted as rainfall in the Momuke station. In contrast, if maximum and accumulated temperature are below 18.13 °C and 43.69 °C, respectively, the precipitation can be predicted as snowfall. Similarly, for Kudi station, if the maximum and accumulated temperature reaches 14.51 °C and 33.17 °C, respectively, the precipitation can be judged as rainfall. While the precipitation will be recognized as snowfall when the maximum and accumulated temperature are below 13.57 °C and 31.68 °C, respectively. In the same way, when the maximum temperature and accumulated temperature in the Xihexiu meteorological

收稿日期 2017-06-27;修回日期:2017-08-31.

基金项目:“千人计划”——新疆项目(374231001);中国科学院国际伙伴关系计划项目(131551KYSB20160002);中国科学院项目(TSS-2015-014-FW-2-1);2016年“创新人才国际合作培训计划”项目(201604910973)。

作者简介:段永超(1990-),男,博士生,主要从事遥感水文研究。E-mail: duanyongchao_1@163.com

*通讯作者:刘铁(1976-),男,博士,研究员,主要从事流域水文过程、河道动力学、地下水耦合模拟研究、遥感技术与分布式水文模型结合、流域与城市洪水灾害预测研究等。E-mail: liutie@ms.xjb.ac.cn

station are above 9.43 °C and 19.53 °C, respectively, the precipitation will be recognized as rainfall and the precipitation will be recognized as snowfall once maximum temperature and accumulated temperature are below 8.22 °C and 19.4 °C, respectively. For validating and evaluating the credibility of this rainfall and snowfall separation method as well as the reasonability of the reference temperature conditions, the meteorological data from the nearby villages of the study catchment were used to assess rainfall and snow separation results. From the results, we can conclude that in different elevation bands, the rainfall and snow separation results are always acceptable with different levels. The precisions are 92.86%, 79.49% and 88.3% in the elevation bands below 2000 m, 2000-3000 m, and 3000 m above sea level, respectively. The results is capable of providing a scientific evidence for monitoring flood types and flood forecasting, which is of great significance and is related to create new water resource management guidelines and planning schemes for local people and decision makers.

Key words: mountainous region; flash flood forecasting; rainfall and snow separation; temperature integral; probability statistics

***Corresponding author:** LIU Tie, E-mail: liutie@ms.xjb.ac.cn

摘要: 气候变暖背景下高海拔山区融雪(冰)以及强降水引发的洪水愈加难以预测,通过山区雨雪分离可判定引发洪水的温度条件,从而为山洪准确预报提供简单而科学的参考依据。本研究以昆仑山提孜那甫河流域为例,基于流域内不同海拔气象站2012-2016年的降水以及温度数据,结合MOD10A2积雪数据,采用温度积分法和概率统计方法,利用研究期内的平均温度,确定出不同降水形态对应的温度条件,以达到雨雪分离的目的。研究结果表明,莫木克站最大温和积温分别达到20.91 °C和51.82 °C时,降水可判定为降雨,最大温和积温分别低于18.13 °C,43.69 °C时,降水可判定为降雪;库地站最大温和积温分别达到14.51 °C,33.17 °C时,降水可判定为降雨,最大温和积温分别低于13.57 °C,31.68 °C时,降水可判定为降雪;西合休站最大温和积温分别达到9.43 °C,19.53 °C时,降水可判定为降雨,最大温和积温分别低于8.22 °C,19.4 °C时,降水可判定为降雪。利用流域内气象站点附近乡镇的气象统计数据对温度条件及分离结果进行验证,在海拔2000 m以下、2000-3000 m以及3000 m以上不同海拔地区的准确率分别为92.86%、79.49%以及88.3%。本研究可为判别洪水类型和洪水预报提供科学参考。

关键词: 山区;山洪预报;雨雪分离;温度积分;概率统计

1 引言

中国山区分布广泛且地形复杂,山洪^[1]频率高发且影响较大。又因山区气候条件复杂,随机性降水事件诱发的山洪增加了山区洪水预报的不确定性。在全球变暖背景下,极端天气以及极端水文事件发生频率较以前有显著增多,范围更大,程度更剧烈^[2]。而目前针对诱发山洪的温度和降水条件尚不清晰,因此有效判定温度和降水的界定条件用以区分雨雪对提高山洪预报准确度有着至关重要的作用。新疆位于中国西北干旱内陆区,有三山夹两盆的地貌特征,山洪灾害发生频繁,尤其在昆仑山地区。历史观测数据表明,近几十年来昆仑山降水量和温度均有增加趋势,是山洪灾害多发的重要地区。据相关报道统计,因山洪灾害死亡的人数约占洪涝灾害死亡人数的70%,受灾损失占50%以上^[3-4]。因此,加强山洪灾害防治工作,逐步建设山洪灾害监测预警系统^[5],定量分析温度条件和降水条件与高山雨雪分离之间关系以确定山洪爆发的可能性

显得尤为重要。

近年来,国内外学者从不同角度对山区雨雪洪水准确预报和预警进行了大量研究^[6-13]。主要集中在山洪的诱发因素、临界条件以及发生过程的模拟^[14-16],气象学者主要着眼于一些触发山洪的强降水监测预警方面研究^[17-19],而水文学者则倾向于利用水文过程模型对山洪进行模拟预测^[20]。无论是降水监测还是水文过程模拟,对山洪准确预报的前提是要准确判断洪水类型,山洪类型主要分为降雨型洪水、融雪融冰型洪水和混合型洪水3种,山区降水形态决定了洪水类型。因此,降水类型的判断是山区洪水预报预警的关键。漆梁波等^[21]通过统计分析得出中国东部地区冬季降水相态的推荐识别判据,并发现综合考虑温度以及温度层的厚度因子的识别判据表现更好。张琳娜等^[22]利用月降水的历史资料统计分析了北京地区冬季出现雨夹雪天气的季节特征,得到不同降水形态的不同阈值范围。李江波等^[23]分别应用高空及地面气温等数据,用0 °C层高度作为降水相态预报指标,并在日常业务中应用。尤凤

春等^[24]总结出地面温度和露点判别指标以及降水相态统计预报方程作为降水相态预报服务的参考依据。姚亚楠等^[25]基于新疆开都河流域4个气象站点的日平均气温与不同降水形态数据的统计分析,结合海拔高程探讨了不同降水形态下的降水频次和降水量与气温的分布规律。然而,目前关于降水相态的区分研究主要集中于东部平原区,关于西部内陆山区降水形态的区分研究较少。此外,目前对雨雪分离的条件的定量化分析研究稍显不足。

本研究以昆仑山提孜那甫河(简称提河)流域为实验区,通过分析该流域的气温、降水和积雪面积变化等特征,基于温度条件与积雪面积变化关系提出区分不同海拔高度降水形态的温度条件阈值,本研究将为该地区山洪预报提供科学参考依据。

2 研究区概况与数据源

2.1 研究区概况

提河位于喀什地区南部,范围为36°30′35″~37°44′43″ N, 76°34′43″~77°16′13″ E, 总面积为5.6×10³ km²(图1)。流域最低海拔为1476 m, 最高海拔为6320 m。提河发源于昆仑山北坡的科克阿克达坂,河源分布着大量的现代大陆冰川、永久性积雪以及季节性积雪。全长335 km,自东南向东北,流经叶城、泽普、莎车等地区,小部分于麦盖提恰隆汇入叶尔羌河。提河日平均温度为6.71℃,日平均降水为0.6 mm,年均流量24.4 m³/s,在1977年出现最大流量达519 m³/s^[26]。每年5~9月为洪水期,12月至次年2月为枯水期。

2.2 数据源

本研究采用的数据主要包括MODIS积雪产品MOD10A2的积雪面积数据(2012~2016)和提河流域内的莫木克、库地、西合休3个气象站的日气温和日降水等实测数据(表1)。山区以及较高海拔地区的降水形态与温度有着密切关系,日积温和日最大温度可以用来作为评价降水形态最主要的2个指标。MOD10A2数据的时间分辨率为8 d,为了保证

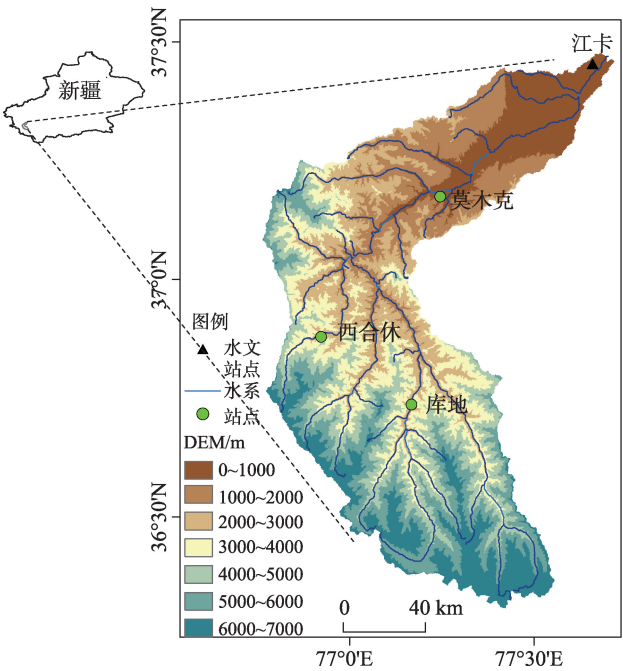


图1 研究区地势特征图
Fig. 1 The topographic features of the study area

气象数据与MOD10A2积雪数据的时间步长一致,对气象观测数据进行处理,即根据积雪产品的时间节点计算出对应的8 d时间中日最大温度平均值,以及8 d的日积温平均值。

3 研究方法

利用MOD10A2积雪产品分析该流域一年之中积雪面积的变化,找到积雪面积减少明显的拐点。从这一时间拐点之后认为降水以降雨形态为主,通过计算此拐点到下一点之间这8 d时间中存在降水的平均日积温和平均日最大温,即可假定当日积温和日最大温分别达此临界条件时,降水即为降雨。到了九月之后该流域的降水主要以降雪为主,因此找到积雪面积显著增加的时间拐点,可以认为从此点之前8 d时间中降水以降雪形态为主,计算有降水天气的日平均积温和日平均最大温,即可假定日积温和日最大温低于此临界条件时的降水即为降雪。

表1 气象站点信息表
Tab. 1 Meteorological station information

气象站点	经度/E	纬度/N	海拔/m	资料数据	时段
莫木克	76°58′10″	37°23′12″	1863	气象、降水	2012~2016
库地	76°58′48″	36°50′27″	2962	气象、降水	2012~2016
西合休	76°39′58″	36°57′31″	3067	气象、降水	2012~2016

3.1 积温计算

渡边直在1979年提出根据日最大温度和日最小温度来计算有效积温的方法,即根据每天气温变化近似正弦曲线的假定进行推算^[27]。基于温度观测数据,找到每天最大和最小温度,采用正弦法将实测数据拟合为一条正弦曲线,计算每日大于0℃的有效积温^[28],如图2所示。

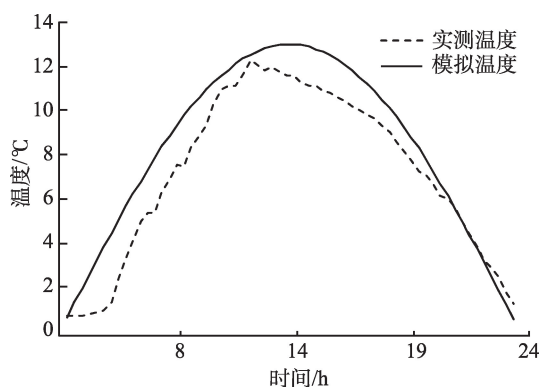


图2 实测数据与模拟数据对比图

Fig. 2 Comparison of measured and simulated data

本文进行积温计算时,采用的是积分方法,首先推导不同情况下积温的计算公式。在实际情况下,一天的积温大致会出现3种情况,分别如图3所示。其中,T1曲线代表的是一天中最小温度高于0℃的情况,T2表示的是0℃介于最大温度和最小温度之间的情况,T3曲线表示的是最大温度低于或等于0℃的情况。一般情况下,积温只包含大于0℃时的温度和,因此求积温时只针对前2种情况。式(1)为一天中温度变化曲线的公式。

$$T = (T_{\max} - T_{\min}) \sin t + T_{\min} \quad 0 \leq t \leq \pi \quad (1)$$

式中: T 代表一天中任意时刻的温度; T_{\max} 代表一天中最大温度; T_{\min} 代表一天中最小温度; t 代表的是弧

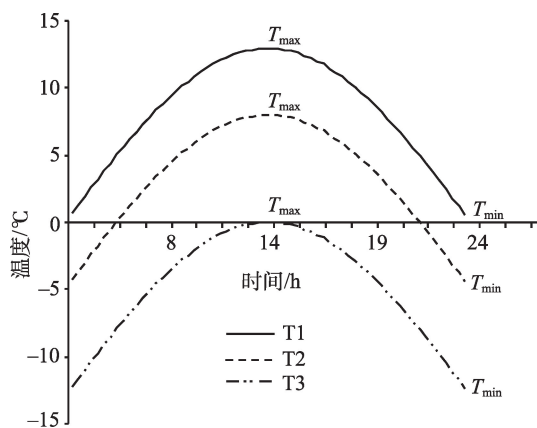


图3 3种不同温度曲线

Fig. 3 Three different temperature curves

度 $[0-\pi]$,因为一天中温度变化大体呈现正弦曲线,将一天中24h转化为弧度 $[0-\pi]$ 进行表示。

因为积温代表的是不低于0℃时的温度,因此对T1曲线情况直接进行积分计算。出现T2曲线情况时,只对0℃以上温度进行积分运算,即先计算出0℃时对应的弧度,并在此区间内对温度进行积分。出现T3曲线情况时,不需要进行积温计算,很明显一天中积温小于零,此种情况下若存在降水,则认为全是以降雪的形式出现。用式(1)推导出日积温的计算式(2)。

$$T = \begin{cases} \int_0^{\pi} (T_{\max} - T_{\min}) \sin t + T_{\min} dt, & t \in (0, \pi) \\ \int_{\sin^{-1}\left(\frac{-T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}\right)}^{\pi - \sin^{-1}\left(\frac{-T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}\right)} (T_{\max} - T_{\min}) \sin t dt, & t \in \left(\sin^{-1}\left(\frac{-T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}\right), \pi - \sin^{-1}\left(\frac{-T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}\right)\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\sin^{-1}\left(\frac{-T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}\right)$ 、 $\pi - \sin^{-1}\left(\frac{-T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}\right)$ 分别表示曲线T2温度为0℃时对应的弧度。

3.2 精度评价

查找3个站点所在地区或者附近地区的气象降水统计年鉴,以此作为区分降水是以降雪还是降雨形态的验证数据。统计按照正弦曲线法确定出降雨温度条件和降雪温度条件,得到各站点降雨和降雪的温度区间。将统计年鉴中存在降雨和降雪时的温度与确定的温度区间进行对比,查看此时的温度是否在所确定的温度区间内,如果存在说明是正确的事件,反之是错误事件。统计总的降水事件个数及正确事件的个数并按照式(3)对区分降雪或降雨事件正确率评价。

$$P = \frac{t}{T} \times 100\% \quad (3)$$

式中: P 表示降雪和降雨事件的正确率; t 表示的是验证数据中正确分类的降雨或者降雪时间的个数; T 表示验证数据中总的降雨或者降雪事件的个数。

4 结果与分析

4.1 提河流域气温与降水变化分析

根据流域内3个气象站点实测的日平均温度和日降水数据对该流域气温和降水变化进行分析。图4是处于不同海拔高度的气象站点的温度与降水变化图。西合休和库地是位于高海拔的山区,莫木克气象站是位于较低海拔的平原区。单纯从温度方

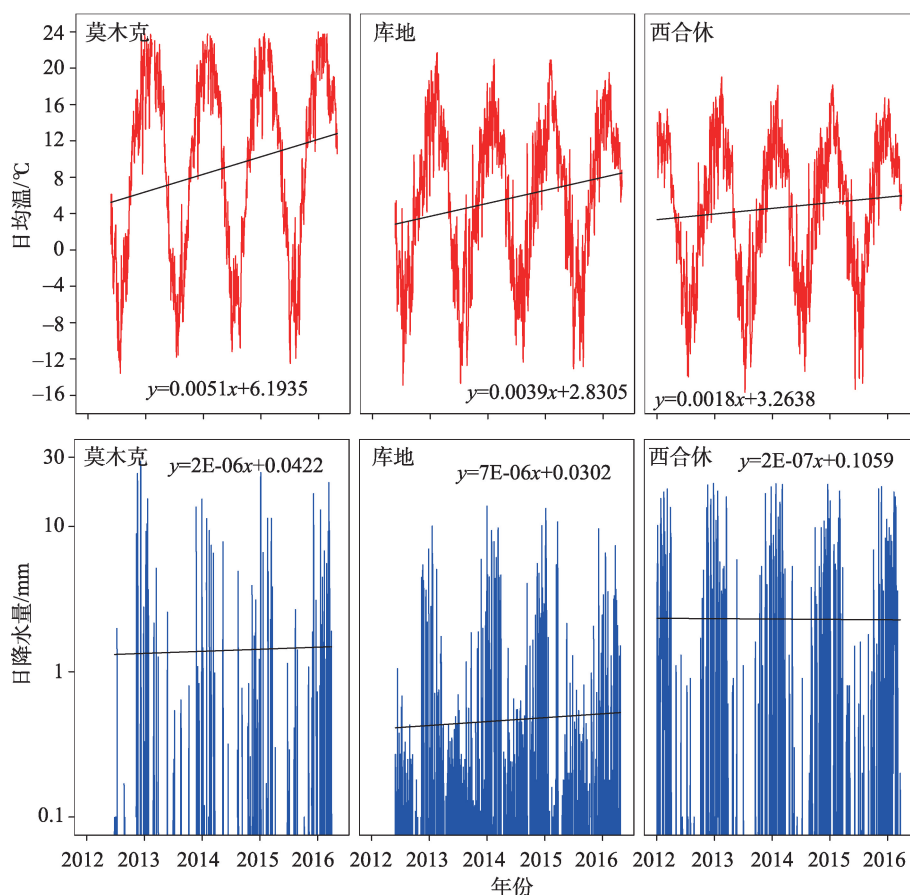


图4 2012–2016年各气象站日平均温度与降水变化曲线

Fig. 4 The daily temperature and precipitation change curve of each meteorological station from 2012 to 2016

面来进行分析,3个站点显示气温在2012–2016年温度均呈现上升趋势,从各气象站的温度趋势线公式中得出,莫木克、库地、西合休的日平均温度增速分别为0.0018、0.0039和0.0051℃。

随着海拔的增加,温度增速逐渐减小。从3个气象站点降水趋势线公式分析降水的变化趋势,莫木克、西合休、库地3站点降水的增速分别为 $-2\text{E}-06$ 、 $7\text{E}-06$ 、 $2\text{E}-07$ 。莫木克降水是呈现减少趋势,库地站和西合休的降水是呈现增加趋势的。与各站点所处的海拔高度联系在一起分析,可以认为从莫木克站点降水来分析提河流域1000~2000 m海拔上的降水为减少区,在2000~3000 m海拔上降水增加最大,3000 m以上海拔的山区降水虽然增加但是增幅相比2000~3000 m地区减少。这说明降水在高海拔山区呈现增加趋势。

4.2 提河流域积雪面积变化分析

通过提取提河流域2012–2016年MOD10A2积

雪数据,得到积雪面积变化情况如图5所示。积雪面积在年内呈现规律性波动,春末夏初温度开始升高,较低海拔山区积雪面积开始萎缩,从来源上看,主要是因为降雪减少;而秋末冬初气温降低,积雪面积逐渐增加,山区降水则以降雪形式为主。年际变化趋势线斜率为正,说明该流域积雪面积整体呈增加趋势,积雪面积最大值出现在2015年12月11日,在2015年冬季积雪面积相比往年明显增加。从图中可知,无论是总的积雪面积变化,还是夏季或者冬季积雪面积变化都呈现增加趋势。冬季积雪面积增加速率最快,夏季积雪面积增加速率最慢。2015年冬季积雪面积在这几年中达到了最大值,2016年夏季积雪面积同样达到了最大值。

4.3 提河流域雨雪分离分析

基于2013年提河积雪面积和莫木克气象站的观测数据,将气象站的观测数据按照积雪数据时间

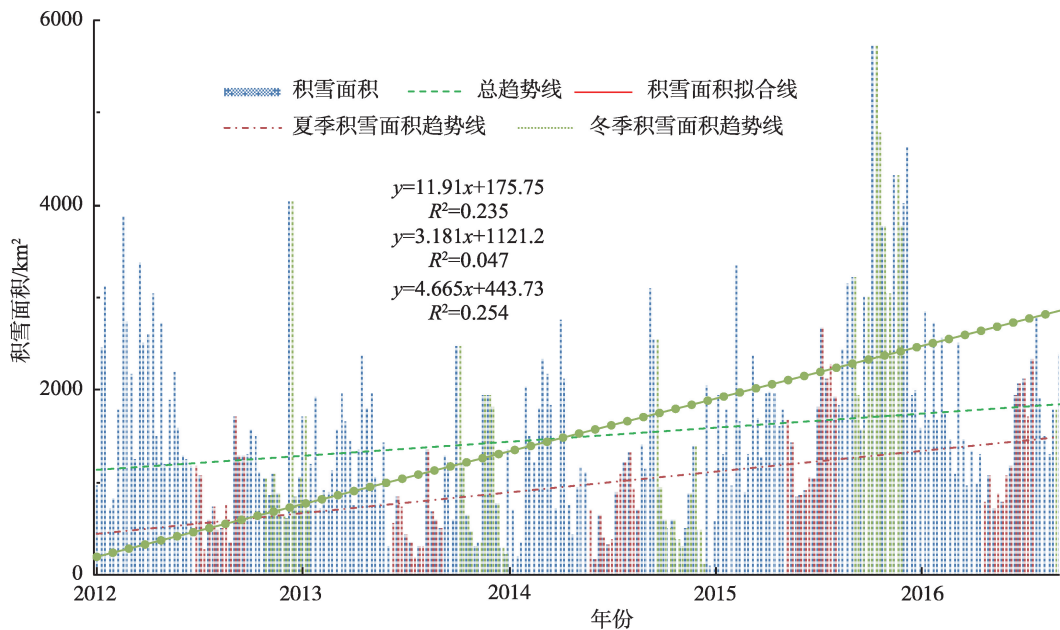


图5 提河流域2012-2016年积雪面积变化图

Fig. 5 The change of snow area of Tihe Basin from 2012 to 2016

步长进行整理,计算积温、平均温度并且与积雪面积变化进行对比分析。春季积雪开始消融,秋季积雪面积重新开始增加,因此可找到积雪面积变化剧烈的点为积雪面积变化转折点。结果如图6所示,在5月9日这一天积雪面积开始减少,而且此后并无明显增加,并且温度处于波动增加趋势,可以假定从5月9日之后开始的降水主要以降雨形态为主,而在11月1日积雪面积有显著增加,并且温度

在11月1日之后温度处于下降趋势,可以判定在10月24日至11月1日之间的降水形态是降雪。利用此种方法,分别对3个气象站点2013-2016年气象数据与积雪面积进行分析,统计得到每个站点历年降雨和降雪拐点的温度(表2)。

通过对表2进行统计分析并对历年日积温和日最大温求平均,莫木克站当日积温不小于51.82℃,且最大温度不小于20.91℃时,降水主要以降雨形

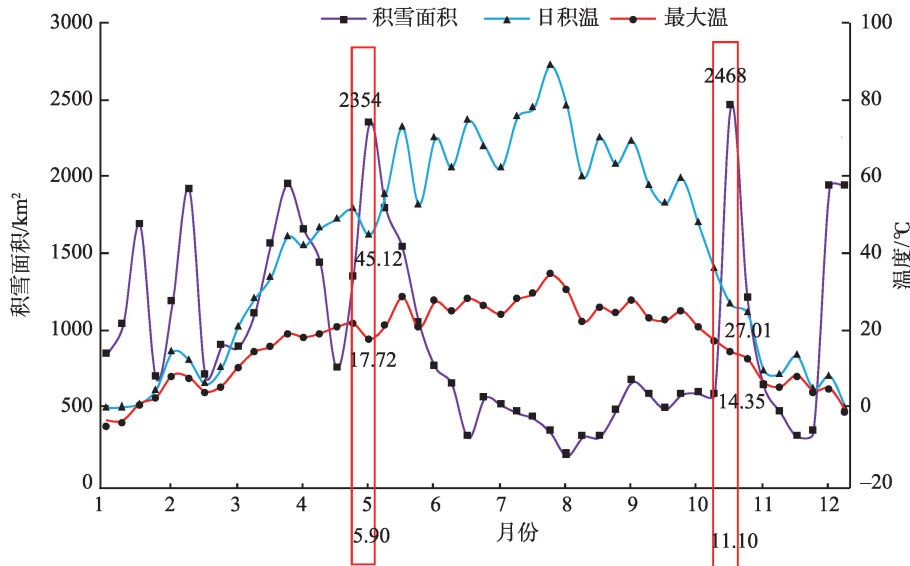


图6 2013年提河流域积雪面积与温度变化关系图

Fig. 6 Relationship between snow area and temperature variation in 2013

表2 站点日积温和日最大温统计表(℃)
Tab. 2 Statistics of site accumulated temperature and maximum temperature

年份	莫木克站				库地站				西合休站			
	降雨温度		降雪温度		降雨温度		降雪温度		降雨温度		降雪温度	
	积温	最大温度	积温	最大温度	积温	最大温度	积温	最大温度	积温	最大温度	积温	最大温度
2013	41.68	16.22	30.03	14.97	28.80	13.03	18.08	9.37	26.05	11.73	1.70	1.41
2014	40.86	16.37	39.21	18.87	35.96	15.04	28.59	14.03	11.21	5.65	11.25	5.79
2015	68.27	28.68	51.97	19.56	18.09	9.06	36.76	14.22	14.40	7.27	29.18	11.29
2016	56.47	22.35	53.56	19.13	49.83	20.92	43.28	16.64	26.45	13.08	35.46	14.37
平均值	51.82	20.91	43.69	18.13	33.17	14.51	31.68	13.57	19.53	9.43	19.40	8.22

态存在;当日积温不大于43.69℃,且最大温不大于18.13℃时,降水主要以降雪为主。而库地站当日积温不小于33.17℃时,且日最大温度不小于14.51℃时,降水主要以降雨形态存在;当日积温不大于31.68℃时,且日最大温度不大于13.57℃时,降水主要以降雪形态存在。对于西合休站来说,当日积温不小于19.53℃,且日最大温度不小于9.43℃时,降水主要以降雨形态存在;当日最积温不大于19.40℃,且日最大温度不大于8.22℃时,降水主要以降雪为主。

4.4 精度评价

通过查找3个站点所在地区或者附近地区的气象降水统计年鉴分别对3个站点所求的降雨温度条件和降雪温度条件进行验证。莫木克站采用的是柯克亚乡2016年5-12月的气象降雨统计数据,西合休站采用的是西合休乡2016年5-12月的气象降雨统计数据,库地站采用的是康克尔柯尔克孜乡2016年5-12月的气象降雨统计数据。

利用概率统计方法对3个站点存在降水事件个数进行统计,当降水事件发生时的积温和最大温度都在所求范围时,认为是正确分类事件,利用式(3)计算正确率,正确率的值即表示出现相应降水事件的概率。如表3所示,莫木克站点的准确率达到了92.86%,库地站准确率为79.49%,西合休站准确率为88.3%。

表3 站点精度验证统计表
Tab. 3 Statistics of the site accuracy verification

站点	事件总数	正确数量	准确率/%
莫木克	14	13	92.86
库地	39	31	79.49
西合休	94	83	88.30

5 结论

本文基于提河流域3个气象站点观测数据和该流域的MOD10A2积雪面积等数据,采用温度积分法、概率统计法等方法对提河流域不同海拔地区降水形态的温度条件进行研究,主要得到以下结论:

(1)在提河流域海拔低于2000 m的地区,当日积温不小于51.82℃,且日最大温度不小于20.91℃时,如果存在降水,则降水形态是降雨的概率为92.86%,当日积温不大于43.69℃,且日最大温度不大于18.13℃时,则降水形态是雨夹雪或降雪的概率为92.86%;

(2)在海拔2000~3000 m的地区,当日积温不小于33.17℃,且日最大温度不小于14.51℃时,则降水形态是降雨的概率为79.49%,当日积温不大于31.68℃,且日最大温度不大于13.57℃时,则降水形态是雨夹雪或降雪的概率为79.49%;

(3)在海拔3000 m以上地区,当日积温不小于19.53℃,且日最大温度不小于9.43℃时,则降水形态是降雨的概率为88.3%,当日积温不大于19.40℃,且日最大温度不大于8.22℃时,则降水形态是雨夹雪或降雪的概率为88.3%。

通过对提河流域不同海拔地区降水形态临界温度的研究,能够很好地区分降水形态,为高寒山区洪水预报及洪水量模拟提供重要的信息。但本文采用的是8 d合成的积雪面积产品来确定降雪事件,在精度上存在一定的不确定性;另外在提河上游高寒山区,用来作为精度验证的统计与观测数据较少,对验证精度可能会产生一定影响。为解决以上不足,后续将安装野外相机对降雨形态进行记录观测,从时间分辨率上可以将时间精度提高到小时级别甚至分钟级别,并对降水形态的温度条件进行修正,为洪水预测预报提供更加准确可靠的参考依据。

参考文献(References):

- [1] 李晓萌,马玥,孙永华,等.基于格网的洪水灾害危险性评价分析——以巴基斯坦为例[J].地球信息科学学报, 2013,15(2):314-320. [Li X M, Ma Y, Sun Y H, et al. Flood hazard assessment in Pakistan at grid scale[J]. Journal of Geo-information Science, 2013,15(2):314-320.]
- [2] 丁一汇,任国玉,石广玉,等.气候变化国家评估报告(I):中国气候变化的历史和未来趋势[J].气候变化研究进展, 2006,2(1):3-8. [Di Y H, Ren G Y, Shi G Y, et al. National assessment report of climate change (I): climate change in China and its future trend[J]. Advances in Climate Change Research, 2006,2(1):3-8.]
- [3] 陈国阶.中国山区发展报告[M].北京:商务印书馆,2010. [Chen G J. Chinese mountain development report[M]. Beijing: The Commercial Press, 2010.]
- [4] 赵刚,庞博,徐宗学,等.中国山洪灾害危险性评价[J].水利学报,2016,47(9):1133-1142. [Zhao G, Pang B, Xu X Z, et al. Assessment on the hazard of flash flood disasters in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016,47(9): 1133-1142.]
- [5] 连健,宫辉力,李小娟,等.基于AO的洪水灾害风险分析模型设计与构建[J].地球信息科学学报,2012,11(3):376-381. [Lian J, Gong H L, Li X J, et al. Design and development of flood/water logging disaster risk model based on ArcObjects[J]. Journal of Geo- information Science, 2012,11(3):376-381.]
- [6] 王礼先.山洪及泥石流灾害预报[M].北京:中国林业出版社,2001. [Wang L X. Mountain flood and debris flow disaster prediction[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2001.]
- [7] 刘志雨.山洪预警预报技术研究与应用[J].中国防汛抗旱,2012,22(2):41-45. [Liu Z Y. Research and application of flood forecasting technology[J]. China Flood & Drought Management, 2012,22(2):41-45.]
- [8] 叶金印,李致家,吴勇拓.一种用于缺资料地区山洪预警方法研究与应用[J].水力发电学报,2013,32(3):15-19. [Ye J Y, Li Z J, Wu Y T. Study and application of flash flood warning method for ungauged basins[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013,32(3):15-19.]
- [9] 王鑫,曹志先,谈广鸣.暴雨山洪水动力学模型及初步应用[J].武汉大学学报·工学版,2009,42(4):413-416. [Wang X, Cao Z X, Tan G M. Shallow water hydrodynamic modelling of rainfall-induced flash flooding[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009,42(4):413-416.]
- [10] G. Blöschl, C. Reszler, J. Komma, et al. A spatially distributed flash flood forecasting model[J]. Environmental Modelling & Software, 2008,23(4):464-478.
- [11] I. Braud, H. Roux, S. Anquetin, et al. The use of distributed hydrological models for the Gard 2002 flash flood event: analysis of associated hydrological processes[J]. Journal of Hydrology, 2010,394(1-2):162-181.
- [12] B. Vincendon, V. Ducrocq, G.M. Saulnier, et al. Benefit of coupling the ISBA land surface model with a TOPMODEL hydrological model version dedicated to Mediterranean flash-floods[J]. Journal of Hydrology, 2010,394(1-2):256-266.
- [13] A.N. Papanicolaou, A. Bdour, E. Wicklein. One-dimensional hydrodynamic/sediment transport model applicable to steep mountain streams[J]. Journal of Hydraulic Research, 2004,42(4):357-375.
- [14] 董玉文,胡江,杨胜发.新疆洪水成因及特性分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2004,23(2):118-122. [Dong Y W, Hu J, Yang S F. Genesis and characteristic analysis of flood in Xinjiang province[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2004,23(2):118-122.]
- [15] 闫彦,刘志辉,叶朝霞.新疆北疆地区融雪洪水灾害预警模型的建立与验证[J].干旱区地理(汉文版),2009,32(4):552-557. [Yan Y, Liu J H, Ye C X. Establishment and validation of early_warning model for snowmelt flood in North Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2009,32(4):552-557.]
- [16] 方立鹤,毛敏,辛琳,等.新疆塔城地区山洪灾害成因分析[J].中国西部科技,2005(11):38-39. [Fang L H, Mao M, Xin L, et al. Cause analysis of mountain torrents disaster in Tacheng area of Xinjiang[J]. Science and Technology of West China, 2005,11:38-39.]
- [17] 刘金涛.雷达估测降雨技术在实时洪水预报中的应用研究[D].南京:河海大学,2003. [Liu J T. The study on the application of weather radar precipitation in real-time flood forecasting[D]. Nanjing: Hehai University, 2003.]
- [18] 张火青,魏文秋.天气雷达在洪水预警中的应用[J].水利水电科技进展,1996,16(3):21-25. [Zhang H Q, Wei W Q. Application of weather radar in flood warning report [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1996,16(3):21-25.]
- [19] 张廷治,李守智,李祥云,等.诱发山洪泥石流特强暴雨的特征[J].气象,1996,22(5):43-47. [Zhang T Z, Li S Z, Li X Y, et al. The features of severe rainstorm induced mountainous mud- rock flows[J]. Meteorological Monthly, 1996,22(5):43-47.]
- [20] 范世香.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社, 2014. [Fan S X. Principles of hydrology[M]. Beijing: China Water&Power Press, 2014.]
- [21] 漆梁波,张瑛.中国东部地区冬季降水相态的识别判据研究[J].气象,2012,38(1):96-102. [Qi L B, Zhang Y. Research on discrimination criterion of winter precipitation

- types in Eastern China[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(1):96-102.]
- [22] 张琳娜,郭锐,曾剑,等.北京地区冬季降水相态的识别判据研究[J].高原气象,2013,32(6):1780-1786. [Zhang L N, Guo R, Zeng J, et al. Study on the criterion of winter precipitation in Beijing area[J]. Plateau Meteorology, 2013,32(6):1780-1786.]
- [23] 李江波,李根娥,裴雨杰,等.一次春季强寒潮的降水相态变化分析[J].气象,2009,35(7):87-94. [Li J B, Li G E, Pei Y J, et al. Analysis on the phase T ransformation of precipitation during a strong cold wave happened in spring [J]. Meteorological Monthly, 2009,35(7):87-94.]
- [24] 尤凤春,郭丽霞,史印山,等.北京降水相态判别指标及检验[J].气象与环境学报,2013,29(5):49-54. [You F C, Guo L X, Shi Y S, et al. Discrimination index of precipitation phase state and its verification in Beijing[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013,29(5):49-54.]
- [25] 姚亚楠,徐俊荣,郭玲鹏,等.气温与降水形态关系研究——以开都河流域为例[J].干旱区研究,2015,32(1):94-101. [Yao Y N, Xu J R, Guo L P, et al. Relationships between temperature and precipitation forms based on the data from meteorological stations[J]. Arid Zone Research, 2015,32(1):94-101.]
- [26] 谢艳玲.浅析提孜那甫河洪水成因及分类特征[J].中国水运月刊,2014,14(12):221-222. [Xie Y L. Analysis on the causes and classification of floods in Tizi Nafu River [J]. China Water Transport, 2014,14(12):221-222.]
- [27] 渡边直,肖悦岩.根据日最高、最低气温计算有效积温的简便方法[J].中国植保导刊,1981(2):39-44. [Du B Z, Xiao Y Y. A simple method for calculating the effective accumulated temperature based on the highest and lowest temperatures[J]. China Plant Protection, 1981,2:39-44.]
- [28] 肖悦岩.介绍一种计算有效积温的方法——根据日最高最低气温[J].植物保护,1983,9(2):43-45. [Xiao Y Y. Introduction to a method for calculating the effective accumulated temperature: According to the daily minimum and maximum temperatures[J]. Plant Protection, 1983,9(2):43-45.]