

引用格式: 闫玉平, 王进华, 刘睿翀. 帕隆藏布流域积雪特征研究[J]. 山地学报, 2024, 42(5): 739-750.

YAN Yuping, WANG Jinhua, LIU Ruicong. Characteristics of snowpack along the Palong Zangbo basin, Tibet, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(5): 739-750.

帕隆藏布流域积雪特征研究

闫玉平, 王进华, 刘睿翀

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

摘要: 帕隆藏布流域的冰雪及其衍生灾害进入高发期。大量前期研究基于现场调查与遥感技术, 对帕隆藏布流域历史雪崩进行了统计分析, 然而针对域内积雪特性研究却鲜有文献报道。本文通过气象数据收集整理、积雪调查与雪坑物理特性测量, 分析了帕隆藏布流域降雪变化趋势、积雪物理特性与分布特征。数据表明: (1) 1970—2020 年, 帕隆藏布流域冬春季平均气温显著升高, 降水量波动幅度增大, 气候不稳定性增强, 2000 年以来相对湿度与最大风速显著减小。(2) 冬春季(冷季)气候变暖, 雪崩发生区正温日数增加。波密地区年降水量、冷季降水量明显增加, 极端强降雪增加, 积雪消融活跃, 同时强风多, 相对湿度大(平均大于 50%), 为雪崩发生创造了物质与热量条件。(3) 帕隆藏布流域属于稳定季节性积雪区, 域内积雪含水量变化范围为 1%~2%, 表层以下雪坑积雪含水量低; 积雪密度多为 $0.1 \sim 0.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 表层因不同程度板结而密度稍高; 积雪温度随深度增加呈上升趋势, 局部可能为 0°C 以上。(4) 域内积雪呈现自东南向西北减薄、自河谷向山顶增大趋势, 西南、南与东南坡向积雪分布明显比其他坡向多, 阳坡积雪多于阴坡。2003—2015 年最大积雪深度变化范围为 10~60 cm, 其中, 松宗镇至然乌段 2003—2015 年最大雪深达到 30~60 cm, 为雪崩的易发、高发区, 该段落内线路工程选线与工程设置宜充分考虑雪崩的影响。帕隆藏布流域积雪研究对于深化域内雪崩机理认识、雪崩数值模型参数率定、雪崩防治、线路工程选线具有重要意义。

关键词: 帕隆藏布流域; 积雪; 雪坑; 分布特征

中图分类号: P642

文献标志码: A

青藏高原东南部帕隆藏布是雅鲁藏布江主要支流, 流域四周高山环绕, 域内地形起伏剧烈, 沟谷深切, 山岭海拔一般多在 3500~5500 m。流域南面是喜马拉雅山, 北面有念青唐古拉山, 东北面受横断山脉阻挡, 独特的地形地貌造成区内集中分布着中国最大的海洋型冰川群, 是中国冰冻圈核心区之一, 也是中国主要雪崩地区^[1]。

全球变暖导致青藏高原冰川退缩加剧^[2-3], 同时青藏高原年降水量以每 10 年 6.59 mm 的速率显著增加, 极端降水的强度与频率亦快速增加^[4]。受到青藏高原的阻挡, 印度洋西南季风的暖湿气流只能沿雅鲁藏布江逆流而上, 随着海拔的递增, 温度的

降低, 暖湿气流易形成高山降雪。

在冰雪共存、气候变暖、降水量增加的藏东南地区, 冰雪灾害及其衍生灾害进入高发期和频发期^[5-8]。帕隆藏布流域东南部高山与外围山麓谷地或平原形成 3000~6000 m 的高差, 雪线附近的冰雪崩作用盛行, 海拔 4800 m 以上为常年雪崩区, 其下为季节性雪崩区^[9]。帕隆藏布流域玉普至然乌段, 是雪崩集中分布区。2010 年 3—4 月强降雪造成 G318 国道 K3868+500 附近 80 km 公路损毁; 2011 年 3 月 12 日, G318 国道 K3864+000~K3920+200 发生 3 次雪崩, 造成大量人员伤亡和财产损失。

积雪和山坡是形成雪崩的基本要素, 当积雪厚

收稿日期 (Received date): 2022-08-15; **修回日期** (Accepted date): 2024-09-05

基金项目 (Foundation item): 国家重点研发计划(2017YFA0603101)。[National Key Research and Development Program (2017YFA0603101)]

作者简介 (Biography): 闫玉平(1989-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 崩塌、边(滑)坡稳定性分析与加固, 支挡结构设计, 铁路工程勘察设计。[YAN Yuping (1989-), male, Ph.D., senior engineer, research on collapse, slope stability analysis and reinforcement, retaining structure design, railway engineering investigation and design] E-mail: 2420907827@qq.com

度达到约 30 cm 时,易发生雪崩^[5-6,9-10],陡坡上积雪深厚的地方可能产生雪崩^[6,9-10]。雪崩对隧道进出口、桥梁及路基等明线工程具有直接威胁,是线路工程建设的新课题和新挑战。积雪作为雪崩发生的物质条件,有必要进行深入研究。

20 世纪 50 年代,中国科学院、中国气象局、东北、西北、西南等各省交通局与铁路局相继开展过积雪与雪崩的调查及防治研究^[11]。1967 年,中国科学院兰州冰川冻土研究所牵头组建了新疆雪灾考察防治工作队,对天山公路积雪特征进行了全面考察研究,并在天山西部巩乃斯河中游海拔 1776 m 处建立了中国第一个“积雪雪崩地面研究站”,对积雪的时空分布特征开始了较系统深入的研究^[11-12]。20 世纪 90 年代以来,随着基础设施建设的推进,主要利用地面调查与遥感分析开展了天山公路^[12-16]、川藏公路^[17-18]、青藏铁路^[19]、川藏铁路^[20]、中尼公路^[21]、精河到伊宁公路^[22] 等特定地区的积雪特性及雪崩研究^[23-26]。有相关文献^[9,17] 基于现场调查统计与遥感手段对帕隆藏布流域历史雪崩进行了统计分析,针对域内积雪特性研究却鲜有文献报道。

地面站点监测与遥感技术(多光谱和微波)是高原高寒山区积雪与雪崩研究常用的手段^[9,18,26],目前,帕隆藏布流域积雪与雪崩地面与遥感监测有以下特点。(1)地面监测站点仅有两个,具有长时

间监测序列的气象站只有波密一个,缺乏不同海拔梯度、长序列气象气候数据,无法满足对域内积雪特征的精准研究。(2)藏东南地区遥感影像数据质量不佳,无法用于详细剖析积雪时空变化。

自动气象监测站架设方便,通过架设在积雪及雪崩形成区,一定程度上可反映研究区局部气象状况,并实现部分积雪参数监测,从而弥补上述不足。

鉴于此,本文旨在通过气象数据分析、现场积雪调查与物理特性测量,掌握帕隆藏布流域降雪变化趋势、积雪物理特性与分布特征,为雪崩发育机理及雪崩数值模拟中模型参数率定提供依据,进而指导帕隆藏布流域线路工程选线与雪崩防治。

1 自动气象站布设情况

帕隆藏布流域山高谷深、地形复杂、气象条件局地性强。目前该流域内现有波密县气象站与八宿县气象站两个站点,但它们相距较远,且主要位于县城海拔较低地区,无法全面反映帕隆藏布流域的气象条件。为此,在帕隆藏布流域自西向东依次加密布设甲中、则普、倾多寺、通参、岗巴、米美、查布和德木拉共 8 个自动气象站。各气象站点信息与分布见图 1(经纬度范围为 29°19'00"~30°17'50"N、94°58'00"~97°2'00"E)和表 1。

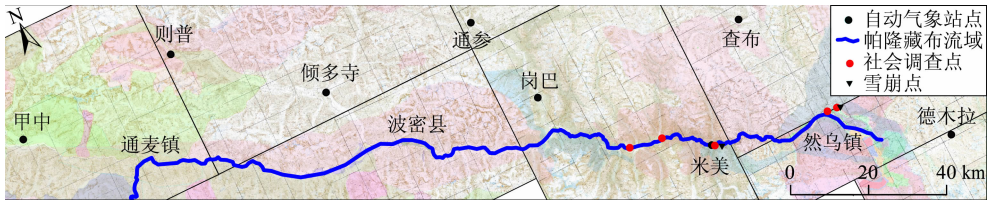


图 1 帕隆藏布流域自动气象站分布图

Fig. 1 Distribution of automatic meteorological stations in the Palong Zangbo basin, China

表 1 自动气象站点信息

Tab. 1 Layout of each automatic meteorological station

站点名称	经纬度	海拔/m	数据时间范围	位置
甲中	30°10'12"N, 94°58'12"E	2169	2019-01—2020-12	易贡茶场冷水鱼养殖基地
则普	30°17'24"N, 95°16'12"E	3336	—	玉许乡则普村寺院内
倾多寺	30°02'24"N, 95°33'36"E	3135	—	倾多镇倾多寺管委会
通参	30°04'12"N, 96°01'12"E	3420	2019-01—2020-03	多吉乡通参村沟口
岗巴	29°49'48"N, 96°06'00"E	3186	2018-11—2020-11	松宗镇岗巴村村委楼顶
米美	29°33'36"N, 96°27'00"E	3512	2018-11—2020-11	米美村
查布	29°47'24"N, 96°39'00"E	4217	2019-01—2020-02	吉达乡江查村
德木拉	29°19'12"N, 97°01'48"E	4792	2019-11—2020-12	省道 201 线德木拉山口

自动气象站的布设旨在监测帕隆藏布流域不同海拔、不同地形特征的主要气象要素,从而分析局地气象特征,并通过气温垂直梯度了解研究区冷季的温度状况,进而分析积雪变化特征。

气象站布设之前,就帕隆藏布流域历史发生雪崩情况进行了调查,具体调查点包括玉普乡阿西村、宗坝村、米美村、然乌镇和然那村,调查对象包括从 25 岁至 70 多岁不同年龄段的人群,主要从社会学视角了解域内积雪及雪崩发生状况、变化趋势与影响情况。

其中,米美气象站布设在米美村,该处为历史雪崩点。各气象站可形成有效的气象要素梯度监测,初步形成了气象要素网格化数据供给能力。

前 7 个自动气象站于 2018 年安装,均为物联型站点,需要借助 2G 手机信号将采集数据实时上传至网络服务器,站点均安装于覆盖网络信号的村落、居民点等地,由此造成了安装点的海拔高度均较低,难以直接反映雪崩形成区附近的气象状况。此外,高海拔区域的降水时空变化数据是进行积雪及雪崩评价和模拟的重要输入数据,由于原有气象站分布海拔低且彼此高差较小,难以直接或通过计算降水垂直梯度获得高海拔地区的降水数据,因此迫切需要在雪崩形成区海拔高度范围内进行直接的气象观测。因此,2019 年在德木拉山口处布设德木拉气象站,现场照片见图 2。

各自动气象站观测时间段为 2018 年 11 月—2020 年 12 月(最长序列),具体观测时间段见表 1。帕隆藏布流域山高谷深,多功能自动气象站可观测范围约为 10~15 km。气象站降水监测利用总雨量桶,通过净水压变化记录降水。由于气象站数据采

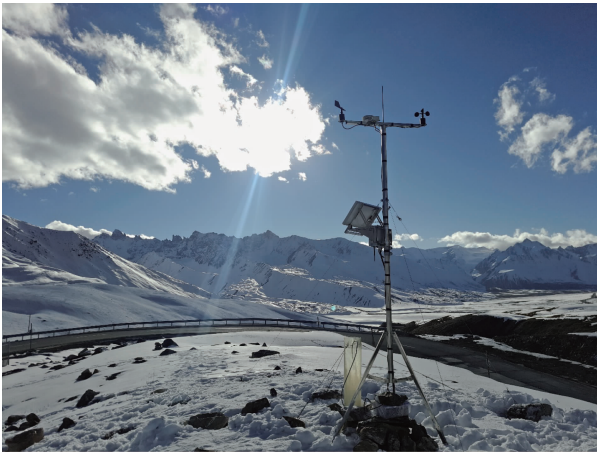


图 2 藏东南地区德木拉气象站

Fig. 2 Meteorological station of the Demula Pass in southeast Tibet

用远程采集方式,数据缺失较为普遍,其中,米美与岗巴气象站基本为 2 年数据,查布、通参与德木拉站为 1 年数据,则普与倾多寺站缺失严重,8 个站点降水量数据均缺失,降雨量数据需要选用邻近基准站数据,各气象站点基本信息见表 1。

2 降雪变化趋势

降雪是积雪厚度增加的直接原因,帕隆藏布流域降雪变化趋势主要通过域内自动气象站获取的短气象数据与气象基站获取的长序列数据进行分析。

2.1 短序列数据分析

自动气象站获取的短序列监测数据见表 2,主要气象数据有气温、风速、风向、相对湿度。各自动气象站点气温最低月份都为 1 月份,最高气温都位于 8 月份,日最高气温位于海拔最低的甲中气象站;

表 2 2018—2020 年帕隆藏布流域多功能自动气象站气象要素信息

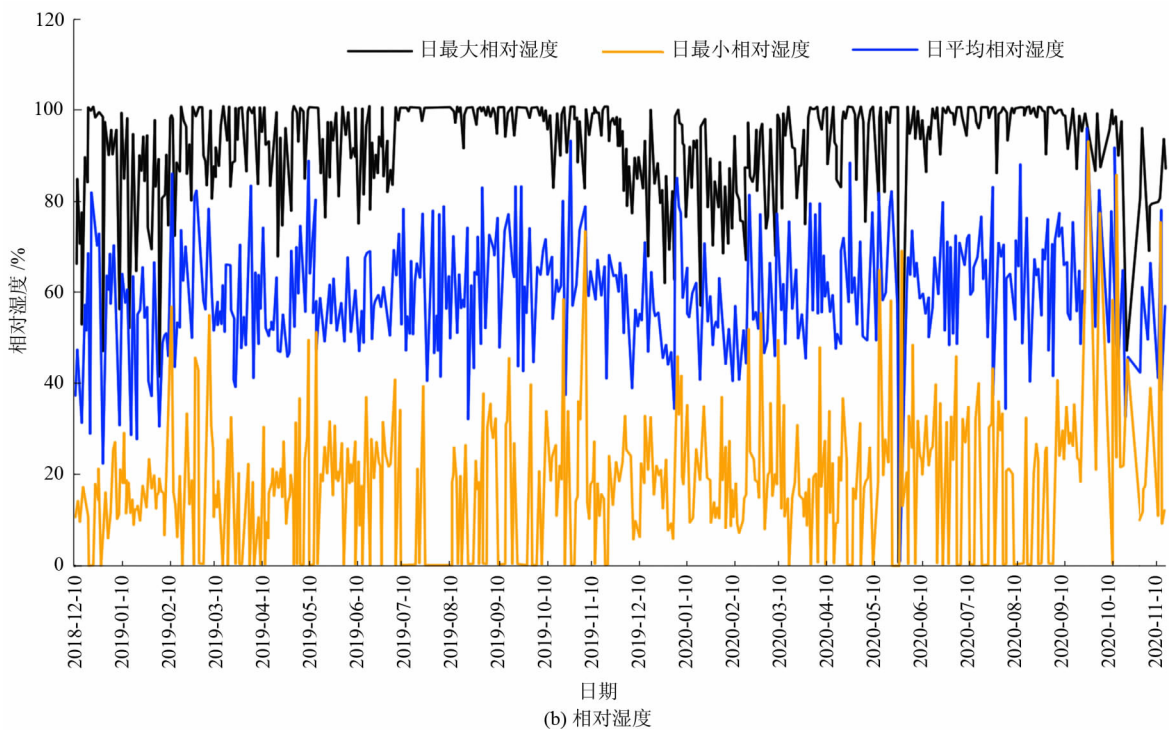
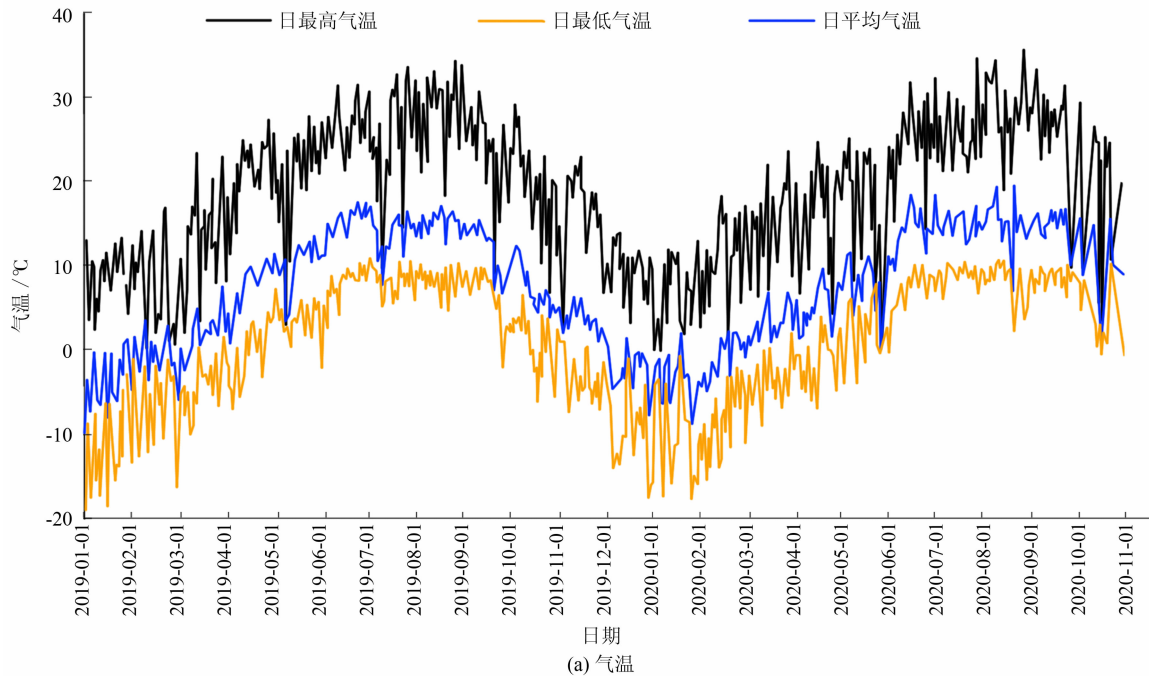
Tab. 2 Meteorological information of the multifunctional automatic meteorological stations in the Palong Zangbo basin from 2018 to 2020

站点名称	气温/℃			风速/(m·s ⁻¹)		风向	相对湿度/%	
	最高	最低	平均值	最大值	平均值		最大值	平均值
甲中	43.20	-7.90	13.81	35.90	3.66	南风	99.99	50.42
则普	34.09	-15.69	5.58	17.50	0.98	西南风	99.99	57.67
倾多寺	41.90	-11.60	2.92	26.30	0.90	西南风	99.99	57.90
通参	35.00	-17.89	6.07	35.90	2.45	东南风	99.99	59.61
岗巴	34.20	-16.39	8.15	35.90	1.60	东南风	99.99	62.73
米美	34.29	-19.10	6.68	35.90	0.88	西南风	99.99	58.66
查布	29.50	-18.60	3.25	17.80	2.27	西南风	99.99	56.40
德木拉	22.39	-18.50	-6.45	35.40	1.57	东南风	96.96	57.02

海拔 3500 m 以上的米美、查布、德木拉气象站日最低气温都低于 -18°C , 其中米美站最低, 为 -19.1°C ; 除德木拉气象站外, 其余气象站监测平均气温都为正温。甲中、通参、岗巴、米美、德木拉气象站测得的最大风速都大于 $35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 年平均风速都相对较小, 风向以西南风和东南风为主。最大相对湿度都接近于 1, 平均相对湿度都大于 50%。

米美气象站位于雪崩核心分布区, 以该站数据

为例进行详细说明, 具体气象监测数据见图 3。该站年平均气温为 6.68°C , 8 月份气温最高, 日最高气温为 34.29°C , 1 月份气温最低, 日最低气温全线最低。整个冬季日间最高气温大多超过 0°C , 按照 $5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的垂直梯度推算, 雪崩形成区最高温为正温的日数较多, 表示积雪消融活跃。风速监测显示, 强风天气多集中于冬季, 2019/2020 冬季风力尤为强盛, 2 月末风力显著减缓。由于气象站位于南



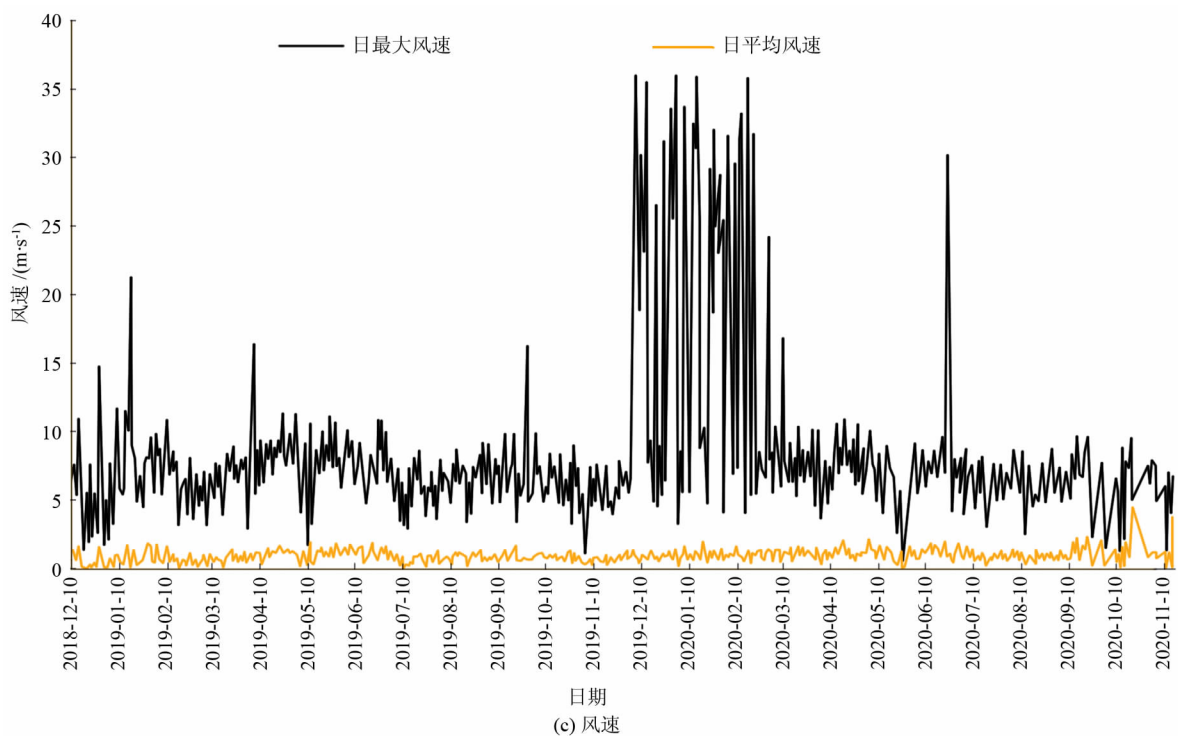


图3 米美气象站监测数据

Fig. 3 Monitoring data of the Mimei automatic meteorological station in the Palong Zangbo basin

西—北东展布的冰川沟口,风向以南西向占主导优势,这些气象条件构成了该处雪崩频发的必要条件。降雨量是反映积雪分布特征的重要指标,由于布设的8个多功能自动气象站降水量缺失严重,为了解帕隆藏布流域近几年降水量情况,选用波密基准站2018—2020年的月降水量数据。波密夏季(6—9月)降水量占年降水量的50.81%,2018、2019、2020年降水量分别为551.63 mm、649.1 mm、920 mm,年平均降水量为706.9 mm,2019、2020年波密站降水量明显增多。帕隆藏布流域雪崩主要发生于冬春季,将前一年10月至次年4月(冬春季)定义为冷季,就冷季降水量而言,2018—2019年为214.7 mm,2019—2020年增加到290.0 mm,2年平均为252.4 mm。

综合来看,帕隆藏布流域沿线地区近年冷季平均气温为 0°C 左右,相对湿度均较大,沿线最大风速变化显著,初步表明,帕隆藏布流域冬春季极端强降雪事件将可能增加,积雪更易消融。

2.2 长序列数据分析

基于波密气象站长序列数据(1970—2019年),分析沿线地区气候的年与季节变化特征,1970年10月—1971年4月定义为1970/1971年冷季,简记为

年份序列1,由此类推,2018年10月—2019年4月则为年份序列48。图4a显示1970年以来冷季气温显著变暖,温升速率约为每10年 0.3°C ,与年平均气温变暖相当。冷季平均降水量较少,为341.2 mm,占全年降水量的39.0%。1970—2020年冷季降水量呈宽幅波动状态,平均降水量基本不变(图4b),主要原因是,该流域位于雅鲁藏布江下游地区,印度洋暖湿气流沿雅鲁藏布大峡谷进入帕隆藏布流域,从而形成较为充足稳定的降水^[27]。值得注意的是,以1992/1993为界,与前一时段相比较,1992年以来冷季降水量波动幅度明显增大,表明冬春季降水极端性增强,多雨/雪与少雨/雪年份更加频繁,而一旦为多降水年份,更易发生雪崩灾害。

1970—2019年帕隆藏布流域相对湿度呈阶段性变化特征,2003/2004年之前,冷季相对湿度波动上升,之后明显降低,见图4c。图4d显示域内最大风速显著减小。

综合来看,帕隆藏布流域沿线地区近年冷季气候显著变暖,降水量基本不变,但波动幅度增大,极端性增强,相对湿度与最大风速显著减小,这些事实表明,该地区冬春季气候不稳定性增强,极端强降雪

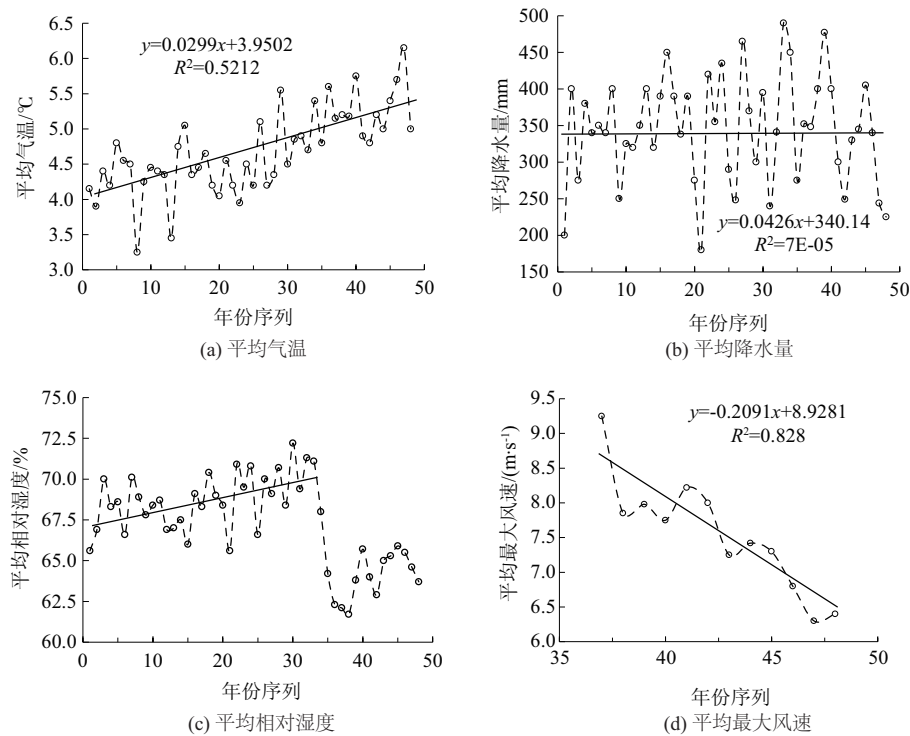


图 4 1970—2019 年波密站冷季气象数据变化情况

Fig. 4 Changes of meteorological data in cold season at the Bomi Station from 1970 to 2019

事件将可能增加,积雪厚度将普遍增大,同时温升显著,积雪更易消融,雪崩事件将可能增加。

3 积雪现场调查与测量

积雪是雪崩形成的重要基础。由于雪崩形成区地势较高,人工难以攀爬,因此选择在德木拉山口积雪区开展积雪特性采集。根据积雪厚度、成因、坡向等不同,于 2019 年 11 月 23—12 月 13 日(冷季)选择四个点进行雪坑剖面采集(图 5),雪坑信息如表 3 所示。



图 5 德木拉山口积雪特性采集

Fig. 5 Field survey of snow characteristic at the Demula Pass

表 3 德木拉山口雪坑信息表

Tab. 3 Basic information of the snow pits at the Demula Pass

雪坑编号	积雪厚度/cm	山坡坡向/(°)	成因
1	48	304	自然降雪 + 风吹雪
2	61	337	自然降雪 + 风吹雪
3	50	57	自然降雪 + 风吹雪
4	25	167	自然降雪 + 风剥蚀

各雪坑通过雪特性仪进行积雪含水量和密度采集,利用手持电子温度计采集积雪温度,采集结果如图 6 所示。初步分析可知,雪坑中积雪含水量变化范围为 1% ~ 2%,表层因冻融活跃,含水量稍高,平均 2.7%;各雪坑积雪密度变化范围为 0.1 ~ 0.2 g · cm⁻³,表层因不同程度板结而密度稍高,平均为 0.2 g · cm⁻³;各雪坑内积雪温度变化幅度大,梯度变化较为显著,随深度增加温度呈上升趋势,该结论与天山稳定积雪区积雪温度随深度变化趋势一致^[28],同时,接近雪层底部,温度达到 0 °C 高温。采集 1 ~ 3 号雪坑距地面约 35 cm 以下温度超过 0 °C 可能是受到环境的影响,总之,表层以下雪坑积雪含水量低、密度小,积雪温度较高。现场雪坑量测表明,该地区冷季积雪消融活跃,地形陡积雪厚的区

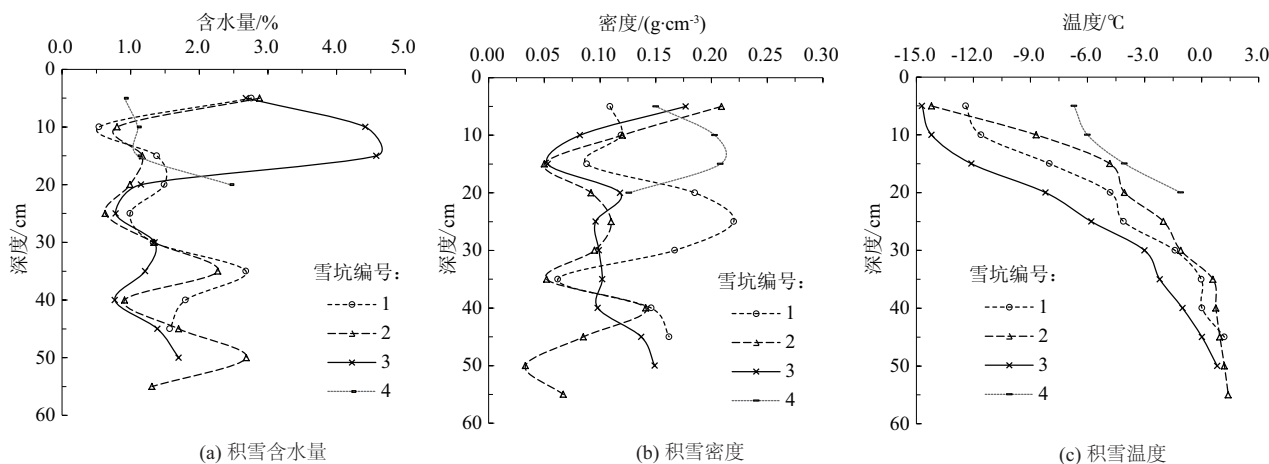


图6 德木拉山口各雪坑积雪物性参数随深度变化情况

Fig. 6 Variation of the snow physical parameters with depth in each snow pit in the Demula Pass

域雪崩事件将可能增加。

4 积雪分布特征

4.1 总体分布特征

由于远程采集,数据较少,当前只能了解各测站周边气温、风速、风向和相对湿度四个要素状况,并通过气温垂直梯度了解冬春季雪崩形成区积雪的温度状况。降水数据缺失严重,难以了解冬春季降雪情况。考虑到自动站观测的降水数据只能代表周边目视范围内的降水情况,不能反映面上积雪空间分布,因此,根据2003—2015年空间分辨率为500 m × 500 m的逐日积雪深度数据^[29-30],在确定研究区范围基础上,运用Matlab编程提取了2003—2015年所有像元点某一日最大积雪深度,得到帕隆藏布流域积雪厚度空间变化图(图7)。德木拉山口最大积雪厚度约为65~78 cm。2019年11月23—12月13日实地测量德木拉山口四个积雪位置处雪深分别为48 cm、61 cm、50 cm、25 cm,实测数据均小于最大积雪深度推测值。造成上述差异的原因如下。①时间差异:2003—2015年的逐日积雪深度数据反映的是这一时间段内的积雪情况,而2019年11月23—12月13日的实地测量则是特定时间点的数据。由于积雪深度受季节、天气等多种因素影响,不同年份、不同时间段的积雪深度可能存在较大差异。因此,时间上的差异可能是导致实测数据小于最大积雪深度推测值的一个重要原因。②空间差异:虽然研究区范围已经确定,但德木拉山口内的积雪分布

可能并不均匀。实地测量的四个位置可能并不能完全代表整个山口的积雪情况。最大积雪深度可能出现在未进行实地测量的其他位置,因此导致实测数据偏小。③数据精度偏低:逐日积雪深度数据空间分辨率为500 m × 500 m,分辨率略低。

但总体来说,基于500 m × 500 m分辨率获取的数据可以反映帕隆藏布流域积雪厚度的空间分布规律。由图7可知,沿线最大积雪深度呈现自东南向西北减薄,自河谷向山顶增大趋势,波密至松宗镇最大雪深变化范围为10 cm(河谷)~40 cm(山坡),松宗镇至米美村最大雪深变化范围为10~50 cm,米美村至然乌最大雪深达到40~60 cm。年累积积雪深度(一年内日积雪深度之和)与年最大积雪深度具有相同的变化趋势,米美乡至然乌镇之间山顶冰川积累区年累积积雪深度可达50 m,沟谷相对较小。

4.2 不同坡向分布特征

帕隆藏布流域地势陡峻,海拔高差大,同时位于南亚季风北进的通道口,冬春季降水主要来自印度洋的西南季风。印度洋暖湿气流沿帕隆藏布溯江而上,受地形影响,降雪量在不同的坡向并不相同。图8显示,西南、南和东南向坡相较其他坡向年最大积雪深度与年累积积雪深度大,这与在天山观测到的积雪分布规律一致^[13]。对研究区内所有阴、阳坡积雪深度进行统计,阳坡平均年累积积雪深度与平均年最大积雪深度分别为1536 cm和38 cm,阴坡平均年累积积雪深度与平均年最大积雪深度分别为1309 cm和35 cm。帕隆藏布流域地区阳坡(南坡)

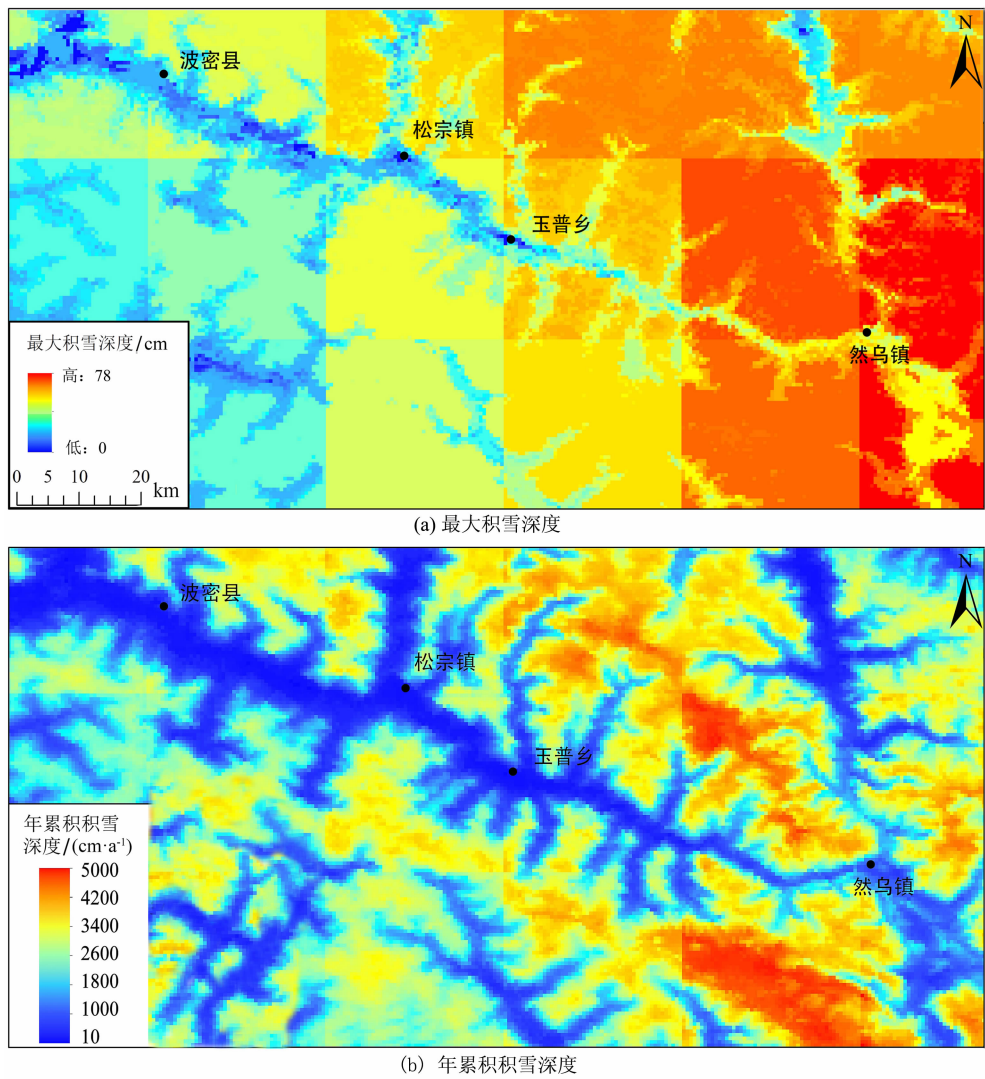


图 7 2003—2015 年帕隆藏布流域积雪深度空间分布
Fig. 7 Spatial variation of snow depth in the Palong Zangbo basin from 2003 to 2015

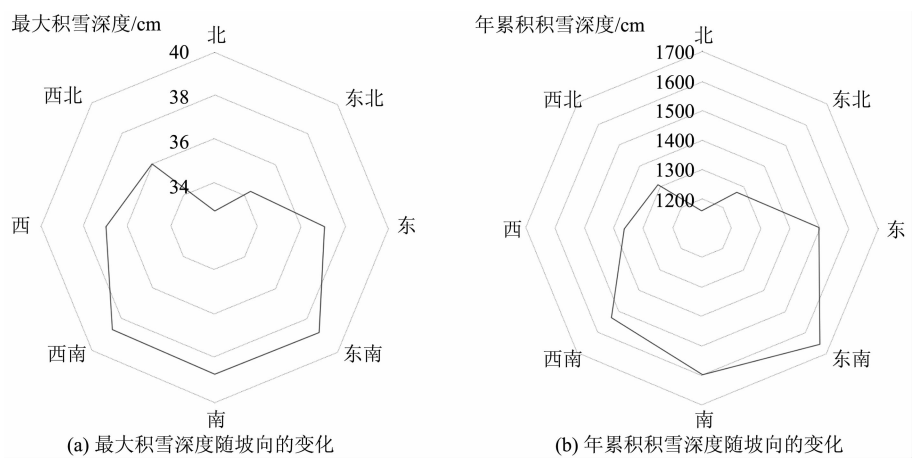


图 8 帕隆藏布峡谷区积雪深度随坡向的变化情况
Fig. 8 Variation of snow depth with slope aspect in the Palong Zangbo basin

积雪量多于阴坡(北坡),这种分布与地形因素有关。

综合积雪空间分布特征,帕隆藏布峡谷区位于稳定海洋型积雪区,且为年平均积雪日数大于100 d的地区。松宗镇至然乌段最大雪深达到30~60 cm,根据山区10年间最大积雪深度超过30 cm的地区为雪崩区的划分标准,该区域为雪崩易发、高发区。

5 讨论与展望

(1)降雪变化趋势是积雪研究的重要部分,气象监测本身就是一种重要的研究手段,长短序列气象数据分析主要为了研究帕隆藏布流域降(积)雪变化趋势,短序列气象数据表明,帕隆藏布流域冬春季极端强降雪事件将可能增加,积雪更易消融;长序列气象数据表明域内冬春季气候不稳定性增强,积雪厚度将普遍增大,积雪更易消融,雪崩事件将可能增加。因此,长短数据分析与积雪特征研究具有较强的关联性。

(2)帕隆藏布流域短序列气象数据获取困难,域内已架设的自动气象站数据精度较低且关键数据缺失较多,目前只掌握了2018—2020年的数据时间,后续需新架设更灵敏的气象站,提高数据获取率。

(3)文中逐日积雪深度数据空间分辨率为500 m×500 m,基于该分辨率获取的帕隆藏布流域最大积雪深度推测值虽然可以满足基本研究需要,但总体分辨率略低,有待获取更大比例尺的数据优化研究结论。

(4)积雪和山坡是形成雪崩的基本要素,但由于同一坡度条件下,受各种自然地理因素影响,积雪深度变化较大,积雪深度和地形坡度建立相应关系比较难,有待细化研究。

6 结论

帕隆藏布流域积雪特征研究对于域内雪崩发育机理认识、雪崩数值模型参数率定、雪崩防治、线路工程选线具有重要意义。本文通过域内基站与自动气象站数据分析、现场积雪调查与雪坑物理特性测量,研究了帕隆藏布流域降(积)雪变化趋势,积雪物理特性与分布特征,主要结论如下:

(1)帕隆藏布流域位于中国稳定季节性积雪区,且为年平均积雪日数大于100 d的积雪地区,亦是海洋型积雪区。域内积雪含水量变化范围为1%~2%,表层以下雪坑积雪含水量低;积雪密度变化范围为0.1~0.2 g·cm⁻³,表层因不同程度板结而密度稍高;积雪温度随深度增加呈上升趋势,局部可能为0℃以上。

(2)1970—2020年,帕隆藏布流域冬春季平均气温显著变暖,降水量虽变化不大,但波动幅度增大,气候不稳定性增强,2000年以来相对湿度与最大风速显著减小。冬春季(冷季)气候变暖,雪崩发生区正温日数增加,波密地区年、冷季降水量明显增加,极端强降水增加,积雪消融活跃,同时强风多,相对湿度大(平均大于50%),为雪崩发生创造了物质与热量条件。

(3)帕隆藏布流域积雪呈现自东南向西北减薄趋势,自河谷向山顶增大趋势,西南、南与东南坡向积雪分布明显比其他坡向丰富,阳坡积雪多于阴坡。2003—2015年最大积雪深度变化范围为10~60 cm,其中,松宗镇至然乌段2003—2015年最大雪深达到30~60 cm,为雪崩的易发、高发区,该段落内线路工程选线与工程设置宜对雪崩做深入研究。

致谢 本研究基于中铁第一勘察设计院集团有限公司某高原铁路雪害专题,该专题合作单位为中国科学院西北生态环境资源研究院,对以杨建平、赵求东、丁永建等为代表的相关成员表示衷心感谢。

参考文献(References)

- [1] 康世昌,陈锋,叶庆华,等. 1970—2007年西藏念青唐古拉峰南、北坡冰川显著退缩[J]. 冰川冻土, 2007, 29(6): 869—873. [KANG Shichang, CHEN Feng, YE Qinghua, et al. Glacier retreating dramatically on the Mt. Nyainqêntanglha during the last 40 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(6): 869—873]
- [2] 张根,孙春卫,杨成业,等. 帕隆藏布流域沟槽型雪崩发育特征及分布规律研究[J]. 高原科学研究, 2021, 5(1): 35—43. [ZHANG Gen, SUN Chunwei, YANG Chengye, et al. Study on the developmental characteristics and distribution pattern of grooved avalanche in Palongzangbu river basin [J]. Plateau Science Research, 2021, 5(1): 35—43] DOI: 10.16249/j.cnki.2096—4617.2021.01.005
- [3] 冀钦,杨建平,陈虹举. 1961—2015年青藏高原降水量变化综合分析[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1090—1099. [JI Qin, YANG Jianping, CHEN Hongju. Comprehensive analysis of the

- precipitation changes over the Tibetan Plateau during 1961 – 2015 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, **40**(6): 1090 – 1099 DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0415
- [4] 王进华. 滇藏铁路主要工程地质问题及地质选线原则研究[J]. 铁道标准设计, 2021, **65**(7): 7 – 13. [WANG Jinhua. Research on main engineering geological problems and principles of geological route selection for Yunnan-Tibet railway [J]. *Railway Standard Design*, 2021, **65**(7): 7 – 13] DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.202007220004
- [5] LI Xiuping, WANG Lei, CHEN Deliang, et al. Near-surface air temperature lapse rates in the mainland China during 1962 – 2011 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(14): 7505 – 7515. DOI: 10.1002/jgrd.50553
- [6] SCHWEIZER J. Snow avalanche formation and dynamics [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, **54**(3): 153 – 154. DOI: 10.1016/j.coldregions.2008.08.005
- [7] ECKERT N, BAYA H, DESCHATRES M, et al. Assessing the response of snow avalanche runout altitudes to climate fluctuations using hierarchical modeling: Application to 61 winters of data in France [J]. *Journal of Climate*, 2010, **23**(12): 3157 – 3180.
- [8] VILAJOSANA I, SURINACH E, KHAZARADZE G, et al. Snow avalanche energy estimation from seismic signal analysis [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, **50**(1): 72 – 85.
- [9] 文洪, 王栋, 王生仁, 等. 藏东南帕隆藏布流域雪崩关键影响因素与易发性区划研究[J]. 工程地质学报, 2021, **29**(2): 404 – 415. [WEN Hong, WANG Dong, WANG Shengren, et al. Key predisposing factors and susceptibility mapping of snow avalanche in Parlun-Tsangpo catchment, southeast Tibetan plateau [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, **29**(2): 404 – 415] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0121
- [10] 郝建盛, 黄法融, 冯挺, 等. 亚洲高山区雪崩灾害时空分布特点及其诱发因素分析[J]. 山地学报, 2021, **39**(2): 304 – 312. [HAO Jiansheng, HUANG Farong, FENG Ting, et al. Analysis of spatio-temporal distribution characteristics of snow avalanche disaster and its triggering factors in the high mountain Asia [J]. *Mountain Research*, 2021, **39**(2): 304 – 312] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000596
- [11] 王中隆. 中国积雪、风吹雪和雪崩研究[J]. 冰川冻土, 1988, **10**(3): 273 – 278. [WANG Zhonglong. Researches on snow cover, snow-drifts and avalanches in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1988, **10**(3): 273 – 278]
- [12] 谢自楚, H. B. 谢维尔斯基, 张志忠. 天山积雪与雪崩[M]. 长沙: 湖南师范大学出版社, 1996. [XIE Zichu, SEVERSKY H B, ZHANG Zhizhong. *Snow and avalanche in Tianshan Mountains* [M]. Changsha: Hunan Normal University Press, 1996]
- [13] 王彦龙. 中国雪崩研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1992. [WANG Yanlong. *Avalanche research in China* [M]. Beijing: Ocean Press, 1992]
- [14] 仇家琪, 等. 雪崩学[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2002. [QIU Jiaqi, et al. *Avalanche science* [M]. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Press, 2002]
- [15] 刘健, 史志文, 刘兰. 天山公路雪崩的判别方法分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2011, **7**(7): 304 – 306. [LIU Jian, SHI Zhiwen, LIU Lan. Analysis on discriminant method of highway avalanche in Tianshan Mountains [J]. *Highway Traffic Science and Technology (Applied Technology Edition)*, 2011, **7**(7): 304 – 306]
- [16] 姜逢清. 公路雪崩危险指标与雪崩灾害评价—以伊(犁)焉(耆)公路巩乃斯沟口至艾肯山隘段为例[J]. 干旱区地理, 1994, **17**(3): 74 – 78. [JIANG Fengqing. Calculation of avalanche hazard-indexes and evaluation of avalanche disasters along a mountain highway: A case study along a section of Ili-Yangqi highway [J]. *Arid Land Geography*, 1994, **17**(3): 74 – 78] DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.1994.03.010
- [17] 赵鑫, 程尊兰, 李亚军, 等. 川藏公路安久拉山至古乡段雪崩分布规律[J]. 山地学报, 2015, **33**(4): 480 – 487. [ZHAO Xin, CHENG Zunlan, LI Yajun, et al. Avalanche distribution analysis in Anjoula Mountain to Guxiang section of Sichuan-Tibet highway [J]. *Mountain Research*, 2015, **33**(4): 480 – 487] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000060
- [18] 杨天军. 川藏公路南线(西藏境)雪崩灾害监测预警技术研究[J]. 中国科技论文, 2018, **13**(8): 921 – 925. [YANG Tianjun. Research on the avalanche disaster monitoring and warning technology in south line of Sichuan-Tibet highway in territory Tibet [J]. *China Science Paper*, 2018, **13**(8): 921 – 925]
- [19] 魏玉光, 杨浩, 韩学雷. 青藏高原铁路沿线雪崩危险度评价方法[J]. 中国安全科学学报, 2004, **14**(4): 44 – 46. [WEI Yuguang, YANG Hao, HAN Xuelei. Method for avalanche risk evaluation along Qinghai-Tibet Plateau railway [J]. *China Safety Science Journal*, 2004, **14**(4): 44 – 46] DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2004.04.010
- [20] 文洪. 帕隆藏布流域沟槽型雪崩时空演化机制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022: 1 – 166. [WEN Hong. Spatio-temporal evolution mechanism of channeled snow avalanches in the Parlun-Tsangpo catchment [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022: 1 – 166] DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2022.003255
- [21] 马东涛, 崔鹏, 王忠华. 中尼公路雪害及防灾对策[J]. 山地学报, 2002, **20**(1): 59 – 63. [MA Dongtao, CUI Peng, WANG Zhonghua. An approach on snow hazards and their countermeasures along Sino-Nepalese highway [J]. *Mountain Research*, 2002, **20**(1): 59 – 63] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2002.01.010
- [22] 张华伟, 童海刚, 鲁安新, 等. 精河到伊宁公路沿线积雪及其影响[J]. 山地学报, 2012, **30**(1): 48 – 56. [ZHANG Huawei, TONG Haigang, LU Anxin, et al. Snow cover along the Jinghe to Yining highway and its impact [J]. *Mountain Research*, 2012, **30**(1): 48 – 56] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2012.01.019

- [23] 刘大翔, 程尊兰, 赵鑫, 等. 雪崩防治工程研究与应用现状[J]. 山地学报, 2013, **31**(4): 425 – 433. [LIU Daxiang, CHENG Zunlan, ZHAO Xin, et al. Research and application situation of avalanche prevention and control engineering [J]. Mountain Research, 2013, **31**(4): 425 – 433] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2013.04.008
- [24] 周石砾. 雪崩危险度评价的程序和方法[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2002, **25**(4): 82 – 87. [ZHOU Shiqiao. Procedure and methods for avalanche hazard evaluation [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2002, **25**(4): 82 – 87]
- [25] 周石砾, 谢自楚. 雪崩危险度评价的类型、特征和方法[J]. 自然灾害学报, 2003, **12**(2): 45 – 50. [ZHOU Shiqiao, XIE Zichu. Categories and methods of avalanche hazard evaluation [J]. Journal of Natural Disasters, 2003, **12**(2): 45 – 50] DOI: 10.1357/j.jnd.2003.0209
- [26] 陈楚江, 余绍淮, 王丽园, 等. 雪崩灾害的遥感量化分析与工程选线[J]. 山地学报, 2009, **27**(1): 63 – 69. [CHEN Chujiang, YU Shaohuai, WANG Liyuan, et al. The quantitative analysis of snow avalanches with remote sensing and engineering scheme selection [J]. Mountain Research, 2009, **27**(1): 63 – 69] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2009.01.008
- [27] 龚成麒, 董晓华, 魏冲, 等. 1978 – 2018 年青藏高原降水区划及各区降水量时空演变特征[J]. 水资源与水工程学报, 2022, **33**(5): 96 – 108. [GONG Chengqi, DONG Xiaohua, WEI Chong, et al. Precipitation division of the Qinghai-Tibet Plateau from 1978 to 2018 and spatiotemporal evolution characteristics of each zone [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2022, **33**(5): 96 – 108] DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2022.05.12
- [28] 高培, 魏文寿, 刘明哲. 新疆西天山积雪稳定期不同下垫面雪物理特性对比[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, **48**(1): 15 – 19. [GAO Pei, WEI Wenshou, LIU Mingzhe. Contrastive analysis of snow characteristics of heterogeneous surface in the stable periods in the west Tianshan, Xinjiang [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2012, **48**(1): 15 – 19] DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2012.01.019
- [29] 车涛, 郝晓华, 戴礼云, 等. 青藏高原积雪变化及其影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, **34**(11): 1247 – 1253. [CHE Tao, HAO Xiaohua, DAI Liyun, et al. Snow cover variation and its impacts over the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, **34**(11): 1247 – 1253] DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.007
- [30] 王建, 车涛, 李震, 等. 中国积雪特性及分布调查[J]. 地球科学进展, 2018, **33**(1): 12 – 26. [WANG Jian, CHE Tao, LI Zhen, et al. Investigation on snow characteristics and their distribution in China [J]. Advances in Earth Science, 2018, **33**(1): 12 – 26] DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2018.01.0012

Characteristics of Snowpack along the Palong Zangbo Basin, Tibet, China

YAN Yuping, WANG Jinhua, LIU Ruicong

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: The Palong Zangbo basin of Tibet is the largest marine glacier distribution area in China. Snow avalanche and their derivatives in the basin enter a high incidence period. Preliminary investigations had been conducted to statistically analyze the historical snow avalanche events in the basin based on field survey and remote sensing, but for the snow accumulation characteristics of the region is rarely reported in the literature.

In this study, it collected both long and short series of meteorological data at field observations in the Palong Zangbo basin; it performed on-site survey and measurement of physical characteristics of snow pits at selected sites; then the trend of snowfall, the physical properties of snowpack and distribution were analyzed.

(1) From 1970 to 2020, the mean yearly temperature in winter and spring in Palong Zangbo has increased significantly. The fluctuation of precipitation increased with instability in climate patterns, and the relative humidity and maximum wind speed has decreased significantly since 2000.

(2) With the warming in winter and spring (cold season), the number of days above zero degrees Celsius in

the avalanche area was increasing. In the region of Bomi, the annual and cold season precipitation increased significantly, with sharp increase in extreme heavy snowfalls, characterized by active snow melting, frequent strong winds, and high relative humidity (average greater than 50%), which created material and heat conditions for avalanche occurrence.

(3) The Palong Zangbo basin was a stable seasonal snow cover area, with snow water content mostly in the range of 1% – 2%, which decreased with depth in snow pits. The density of snowpack was mostly between $0.1 - 0.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, with slightly higher in snow surface due to hardening to some extent; snow temperature increased with depth, possibly reaching up to 0°C at some sites.

(4) The snowpack distribution described a trend of thinning from southeast to northwest, and increasing from the valley floor to the crest. The snows on the southwest, south, and southeast slopes were noticeable thicker than those on slopes with other aspects; snows accumulation on sunny slopes were more than those on shady slopes. From 2003 to 2015, the maximum snow depth in the basin varied from 10 to 60 cm, of which the maximum snow depth reached to 30 to 60 cm in the section from Songzong Town to Ranwu Town, where it had been known for high snow avalanche incidence and it should be skilfully avoided in route selection and designed by engineering settings in railway engineering.

This study of snows characteristics is of great significance for deepening the understanding of avalanche mechanism, parameter determination of avalanche in modelling, avalanche control, and railway engineering route optimization.

Key words: the Palong Zangbo basin; snowpack; snow pit; characteristics of snowpack

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)