

兰州大学

# 毕业论文

(本科生)

论文题目（中文） 藏东南雪崩形成条件浅析

论文题目（外文） ANALYSIS ON THE  
FORMING CONDITIONS OF AVALANCHE  
IN THE SOUTHEAST TIBETAN PLATEAU

学 生 姓 名 邬俊飞

导师姓名、职称 姚檀栋 研究员

学生所属学院 资源环境学院

专 业 自然地理与资源环境

年 级 2015 级

兰州大学教务处

## 诚信责任书

本人郑重声明：本人所呈交的毕业论文（设计），是在导师的指导下独立进行研究所取得的成果。毕业论文（设计）中凡引用他人已经发表或未发表的成果、数据、观点等，均已明确注明出处。除文中已经注明引用的内容外，不包含任何其他个人或集体已经发表或在网上发表的论文。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：\_\_\_\_\_

日 期：\_\_\_\_\_

## 关于毕业论文（设计）使用授权的声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属兰州大学。本人完全了解兰州大学有关保存、使用毕业论文的规定，同意学校保存或向国家有关部门或机构递交论文的纸质版和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权兰州大学可以将本毕业论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用任何复制手段保存和汇编本毕业论文。本人离校后发表、使用毕业论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，第一署名单位仍然为兰州大学。

本毕业论文研究内容：

可以公开

不宜公开，已在学位办公室办理保密申请，解密后适用本授权书。

（请在以上选项内选择其中一项打“√”）

论文作者签名：\_\_\_\_\_

导师签名：\_\_\_\_\_

日 期：\_\_\_\_\_

日 期：\_\_\_\_\_

## 藏东南部雪崩形成条件浅析

### 摘要

雪崩是发生在山地地区的一种严重的自然灾害。藏东南地区雪崩高发主要与其独特的自然地理因素关系密切。新构造运动形成的陡峻的地形是藏东南雪崩发育的基础；而孟加拉湾暖湿气流带来的丰沛的降水为雪崩发育提供了物源。本文利用 Google Earth 数据、国家气象中心数据以及实地观测数据分析了藏东南雪崩与自然地理因素之间的关系。发现这一地区雪崩多发育于  $30^{\circ}\sim45^{\circ}$  的坡度和阴坡（西北、北和东北）条件，与前 3 日气温升高关系密切。藏东南雪崩多爆发于冬春季，冬季雪崩类型以新雪雪崩为主，春季雪崩类型以湿雪雪崩、全层雪崩和新雪雪崩为主。

**关键词：**藏东南；雪崩；地形；气候；积雪场

# ANALYSIS ON THE FORMING CONDITIONS OF AVALANCHE IN THE SOUTHEAST TIBETAN PLATEAU

## Abstract

Avalanche is a serious natural disaster in mountainous areas. The high incidence of avalanche in southeast Tibet is closely related to its unique physical geography. The steep topography formed by the neotectonics is the basis for the development of avalanche in southeast Tibetan Plateau. The abundant precipitation from warm and humid air currents in the Bay of Bengal provides a material source for avalanche. This paper uses Google Earth data, National Meteorological Information Center data and field observation data to analyze the relationship between the avalanches in Southeast Tibetan Plateau and the physical geography. It is found that the avalanche occurred in slope of  $30^{\circ}\sim45^{\circ}$  and negative aspect ( northwest, north and northeast), which is closely related to the temperature rise in the previous 3 days. The avalanches occur mostly in winter and spring, and the new-snow avalanches are the main type in winter, while the main type in spring are the new-snow avalanche, the wet-snow avalanche, the full-depth avalanche.

**Key words:** Southeast Tibetan Plateau, avalanche, topography, climate, snowpack

## 目 录

摘要	I
Abstract	II
目录	III
1. 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 选题依据	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 雪崩形成条件研究进展	2
1.2.1 地形条件	2
1.2.2 气象气候条件	3
1.2.3 积雪场性质	4
1.2.4 外部扰动	4
1.3 研究内容	5
2. 资料与方法	5
2.1 资料来源	5
2.2 处理方法	6
3. 藏东南雪崩形成条件浅析	7
3.1 地形条件	7
3.1.1 坡度分析	7
3.1.2 坡向分析	9
3.2 气象气候条件	9
3.2.1 短期气象条件分析	9
3.2.2 积雪气候类型	10
3.3 积雪场性质分析	12

4.结论与展望.....	14
4.1 结论 .....	14
4.2 展望 .....	15
参考文献.....	16
致    谢.....	19

## 1.绪论

### 1.1 研究背景及意义

#### 1.1.1 选题依据

雪崩指雪块在陡峭山体快速崩落的现象，常发生于高山区，具有瞬时性、快速性、不确定性和冲积压力大等特点，能够导致严重的人员伤亡和财产损失，对社会经济和自然环境造成严重影响<sup>[1]</sup>，如 1996 年 3 月 24 日西藏波密县然乌发生的雪崩灾害造成 64 人罹难，是我国有记录以来伤亡最大的雪崩灾害事件。

近年来，受山区经济发展、人口密度增加及全球变暖等因素影响，山地灾害风险呈现增加趋势<sup>[2]</sup>，而雪崩灾害作为发生频率最高的山地灾害之一<sup>[1]</sup>，且其对气候变化十分敏感<sup>[3,4]</sup>，因而受到了越来越多人关注<sup>[5]</sup>。

我国雪崩灾害多发生于青藏高原地区，其中藏东南尤为频发<sup>[5]</sup>，这也与其独特的自然地理环境密切相关。青藏高原地区作为“世界屋脊”和“第三极”，平均海拔超过 4000m，是长江、黄河、布拉马普特拉河（上游被称为雅鲁藏布江）、恒河、印度河、湄公河、萨尔温江和塔里木河等众多亚洲河流的发源地<sup>[6]</sup>，而藏东南地区处于高原边缘，河流侵蚀强烈，陡坡地分布面积广，高差巨大，特殊的地形地貌为雪崩形成和发育提供了有利条件；同时藏东南受印度洋水汽影响，当海拔超过 4000 米以上时，年固体降水量最高可达 1000mm，而海拔升至 4800m 后，降水则几乎完全为固态形式<sup>[7]</sup>，这为雪崩发育提供了物质基础；最后，该区全年日平均气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 的日数能达到 150 天左右<sup>[8]</sup>，这给雪崩物质长时间保持创造了有利条件。

常年多发的雪崩灾害严重影响了藏东南地区居民的正常生产生活，制约着当地社会经济的可持续发展，其中雪崩灾害对道路交通的影响最为深远。据统计<sup>[8]</sup>，平均每年受雪崩引起的交通中断都在 7 日以上，极端年份持续时间更长，如 1979 年 2 月然乌 82 道班附近发生的大雪崩导致公路封闭了半月之久，每年养护公路耗费的大量人力、物力和财力给当地财政带来了较大负担，故对藏东南地区开展雪崩灾害防治研究十分必要，其中雪崩形成条件研究作为雪崩研究的重要内容，不容忽视。

### 1.1.2 研究意义

雪崩形成条件研究是开展雪崩动态模拟、风险评估、灾害预防与适应等研究的基础，也是实际工程应用的基础<sup>[9]</sup>，而雪崩形成演化受区域雪崩形成条件影响较大，所以在开展区域雪崩防治工作时还需充分考虑区域雪崩特征。尽管我国学者早在上世纪末就对藏东南地区开展过雪崩灾害研究<sup>[7,8]</sup>，但未系统地阐述雪崩形成条件特征，对该区雪崩形成演化机制缺乏进一步认识。

目前雪崩形成条件研究已取得较大进展，但对藏东南区域研究较少，国际上主要集中在欧洲、北美等高山区<sup>[10-13]</sup>，国内则主要集中在喀喇昆仑、天山等地<sup>[14,15]</sup>。另外，近年来受全球变化影响，青藏高原气温、水汽等环境要素都呈现出明显的趋势变化<sup>[16,17]</sup>，但影响雪崩形成演化环境要素的耦合机制仍不得而知，这将给藏东南雪崩防治增加不确定性，是一个亟待解决的科学问题。

综上，笔者对藏东南雪崩形成条件进行分析，探究其区域雪崩形成演化特征，不仅能为区域内雪崩预测、工程防治和应急处置等提供科学指导，而且也是未来研究雪崩形成环境因子耦合机制的基础。

## 1.2 雪崩形成条件研究进展

雪崩的形成条件是开展雪崩预测和工程防治的基础，包括地形条件、大气环境、积雪场性质和外部扰动，现对当前雪崩形成条件研究进展进行简单概述。

### 1.2.1 地形条件

地形条件是雪崩形成条件中最为基础的要素，也是决定雪崩频率的最重要的要素之一，通常包括形成区坡度、坡向、下垫面粗糙程度、海拔、距分水岭距离和坡面凹凸度等<sup>[18]</sup>。Gleason<sup>[19]</sup>通过分析蒙大拿州超过 3500 起雪崩事件的地形数据，发现地形要素可以解释超 60%的自然雪崩事件，对于人为触发雪崩比例能达到 80%。绝大多数雪崩的形成区坡度都在 30°~45°，当坡度超过 55°时，雪崩类型主要为松雪雪崩<sup>[20]</sup>。Schweizer 和 Jamieson<sup>[21]</sup> 对瑞士和加拿大 809 起雪崩事件的大量坡度数据分析结果表明，绝大部分雪崩发生在坡度 30°~50°之间。因此 Munter<sup>[22]</sup> 和 Meister<sup>[23]</sup> 建议坡度  $>40^\circ$  的地区不适合建造滑雪场。同时，其他地形参数也在雪崩形成过程中发挥作用。Maggioni<sup>[24]</sup> 对瑞士达沃斯地区雪崩事件分析结果显示，坡度为 36° 的凹形坡雪崩发生频率最高。

另外，下垫面的粗糙程度主要通过影响连续性软弱层（persistent weak layer）的形成从而影响雪崩的发生<sup>[1]</sup>。山坡上的植被密度也是影响雪崩形成的一个重要因素，这是由于树木的截留不仅阻止了积雪中软弱层的形成，而且改变了暴风雪

时新雪的沉降和再分配<sup>[25]</sup>，因此植树造林也是最有效、长久的雪崩防治措施。

### 1.2.2 气象气候条件

积雪是大气的产物，大气环境对于积雪场性质有着重要影响，学者一般从气象和气候两方面对大气环境进行探讨。

当前许多研究均表明，气温和降水等气象要素在雪崩爆发中扮演着重要角色。Jomelli 等<sup>[26]</sup>对法国阿尔卑斯山区雪崩爆发时的气象条件进行分析，结果显示高频雪崩沟槽爆发雪崩主要与高频降水（ $\geq 3$  days）和高于平均的温度（平均值， $\pm 1$  S.D.）相关，低频雪崩沟槽爆发雪崩主要与高频降水（ $\geq 3$  days）相关；Baggi 和 Schweizer<sup>[10]</sup>对瑞士高山区湿雪崩与其气象条件的分析结果表明，在过渡性气候区湿雪崩和干雪崩形成都与降水事件有关，而板结湿雪崩的形成主要与升温和融水有关；Birkeland 等<sup>[27]</sup>对美国山区雪崩活动和气象资料进行主成分分析，发现雪崩活动与高强度降雪和高雪水当量密切相关。

早在 1949 年，瑞士联邦冰雪研究所学者 Roch<sup>[28]</sup>就开始了雪崩与其气候区划研究，将美国雪崩区域气候特征划分为三类：海洋气候区（maritime）、大陆气候区（continental）和介于两者之间的山间气候区（intermountain）后，山间气候区得名是因为该区域正好位于美国山区地形中，后来学者<sup>[11]</sup>为了研究的严谨性，引入了过渡气候区（transition）的概念代替之，而山间气候区现在一般特指美国西部的过渡气候区；随后，Armstrong 和 Armstrong<sup>[29]</sup>首次通过定量化手段分析三类气候区的气温、降水及积雪场物理性质等资料，提出了气候分类标准，并据此提出了雪崩气候（avalanche climate）概念；而 Mcclung 和 Schaerer<sup>[11]</sup>在雪崩气候概念基础上，将雪崩积雪场性质变化考虑在内，提出了积雪气候（snow climate）概念。当前，这一概念已为学术界所接受。

不同积雪气候区，区域整体雪崩特征往往都存在较大差异。一般来说，大陆性气候区温度低、降雪少，积雪场极易形成深霜、表霜等软弱层（weak layer），因而对外界环境更为敏感，较小强度的新雪和风吹雪事件都能诱发雪崩；海洋性气候区气温较高、降雪多，积雪场不易形成软弱层，雪崩受升温或强降雪事件影响较大；而过渡气候区受大陆性气候和海洋性气候共同作用，区域雪崩特征介于两者之间，但某区域积雪气候并非固定不变的，它还会受大气环流系统影响而出现年际变化<sup>[30]</sup>。积雪场大气环境对于雪崩形成演化都起到了非常重要的作用，因此在开展雪崩形成条件研究时，积雪气候和大气条件的分析对于我们认识区域雪崩特征是非常重要的。

### 1.2.3 积雪场性质

积雪场性质对于判断雪体稳定性十分重要<sup>[31]</sup>，其中软弱层的存在与否最为关键。软弱层依据其持续时间长短，可分为连续性软弱层和非连续性软弱层（nonpersistent weak-layer）。连续性软弱层通常发生于温度梯度 $>10^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 条件下，其实质是水汽在温度梯度下从温度高处向温度低处迁移<sup>[11]</sup>，连续性软弱层持续时间可达数周至一个月之久，可分为表霜、深霜、面状雪晶及与积雪场连接较弱的结晶壳等类型，具有强度小、抗剪切能力弱和各向异性等特点，雪晶间联结较弱，因此雪层强度小且稳定性差。表霜和深霜是最为常见的两种持续性软弱层，表霜常形成于晴朗无风的夜晚，有利于底层水汽至雪体表层后遇冷结晶；而深霜常形成于雪体中的较冷雪层，水汽在雪层中向上运移过程中，并未到达雪体表层而直接在较冷雪层处结晶<sup>[25]</sup>。非连续性软弱层持续时间较短，主要形式为新雪，由于新雪雪体疏松、强度小且尚未与下层雪层建立联结，因而当出现强降雪时，新雪层载荷增加导致积雪场稳定性降低，但经过一段时间以后，新雪在上层雪体压力和变质作用下，强度会迅速增加，导致雪体稳定性增加<sup>[11]</sup>。

假如雪层中不存在软弱层，再大的暴风雪和风吹雪都无法导致雪崩发生，而当雪层中存在软弱层时，小强度的风吹雪也能诱发雪崩，因此软弱层是雪崩发生的必要不充分条件。软弱层是指雪体中某一较其相邻雪层强度偏小或连接较弱的雪层，通常作为雪崩运动的滑动面<sup>[25]</sup>。软弱层强度主要与雪层雪晶类型及雪晶尺寸有关，一般雪晶类型凹度越大、雪晶尺寸越大，雪层强度越低，而雪晶类型及尺寸除与降雪时大气环境有关外，还与雪体温度梯度有着很大关系<sup>[20]</sup>。

### 1.2.4 外部扰动

外部扰动是雪崩爆发的重要触发机制，外部扰动可分为人为扰动、自然扰动两种。自然扰动包括强降雪、风吹雪和地震等，人为扰动包括人类活动和雪崩爆炸排险等，人类活动诱发的雪崩事件约占灾难性雪崩事件的 85%<sup>[21]</sup>，绝大多数的干雪板状雪崩都是受极端的降雪诱发的<sup>[1]</sup>。外部扰动诱导雪崩的基础是存在软弱层，当软弱层受到外界扰动，其剪切压力超过其剪切强度时，就会产生破裂并在雪层中快速传播，通常破裂的临界尺度在 0.1m~10m 之间<sup>[32]</sup>，Reiweger 等<sup>[33]</sup>则提出利用声波监测积雪破裂过程从而预防雪崩，Perla 和 Lachapelle 认为软弱层抗减强度的减小是导致破裂的根本原因<sup>[34]</sup>，但目前对于软弱层破裂过程仍然存在争论，使得在模拟外部扰动对积雪场不稳定性影响时存在不确定性。

### 1.3 研究内容

藏东南地区每年频发的雪崩灾害严重制约了当地经济的发展,且当前对藏东南地区雪崩研究也相对偏少,对于区域雪崩形成机制认识不足,因此笔者拟从雪崩形成条件角度出发,对藏东南雪崩形成条件进行简要分析,得到区域雪崩特征。据此,本文拟分为四部分,各部分内容简介如下:

第一部分是绪论,阐述本文的选题依据及研究意义,综合叙述当前雪崩形成条件研究进展,并简要说明本文将要解决的问题。

第二部分是资料和方法,介绍本文所使用的资料来源,并简要说明处理方法。

第三部分对藏东南雪崩地形条件、大气环境及积雪场性质进行简要分析,探究区域雪崩特征。

第四部分对全文进行总结,并对未来研究方向进行展望。

## 2.资料与方法

### 2.1 资料来源

本文中所使用的高分辨率遥感影像及数字高程模型(DEM)均获取于Google Earth,公路沿线雪崩沟槽数据获取于历史文献<sup>[35]</sup>,2011~2016年历史雪崩信息获取于新闻媒体(见表1)。

气温、降水等气象数据则来自国家气象中心(<http://data.cma.cn/site/index.html>)中国地面累年值日值数据集(1981~2010年)、中国地面气候资料日值数据集(2011~2016年)和积雪深度数据集(1951~2006年),共选取了藏东南地区10个气象站点数据(见表2)。

表1 雪崩发生信息

编号	雪崩发生地点	发生时间	灾情	气象站名	信息来源
I	松潘县雪宝顶	2011-10-02	1人死亡、1人受伤	类乌齐	[36]
II	定日县拉马拉崖口	2013-10-13	4人遇难	定日	[37]
III	吉隆县扎噶寺	2015-02-24	数十人被困	聂拉木	[38]
IV	边坝县金岭乡卡许村	2015-04-14	2人遇难	洛隆	[39]
V	石渠县尼呷镇	2015-04-21	1人遇难	石渠	[40]

表 2 气象站点信息及积雪气候类型

站名	经度/°	纬度/°	海拔/m	积雪气候类型
丁青	95.36	31.25	3873.1	2
类乌齐	96.36	31.13	3810.0	2
昌都	97.1	31.09	3315.0	1
洛隆	95.5	30.45	3640.0	1
波密	95.46	29.52	2736.0	1
八宿	96.55	30.03	3260.0	1
林芝	94.2	29.4	2991.8	1
米林	94.13	29.13	2950.0	1
左贡	97.5	29.4	3780.0	1
察隅	97.28	28.39	2327.6	1

注：积雪气候类型中 1 代表海洋性气候，2 代表过渡性气候。

## 2.2 处理方法

1.本文所有空间分析过程均借助地理信息系统软件 Arcgis 完成，所有数据统计过程均借助 Matlab 完成。

2.本文积雪气候类型分类标准是建立在 Mock 和 Birkeland<sup>[30]</sup>研究基础之上，选取 1981~2010 年期间气象数据进行分析，积雪气候分类标准见图 1，输入数据为 1、2、3 和 12 月的降水、降雪总量和平均温度数据，值得指出的是，由于气象站部分年份降雪监测数据缺失，笔者使用 1976/1977~2006/2007 年降雪数据近似替代了 1981/1982~2010/2011 年的降雪数据，笔者认为数据蕴含的气候尺度信息偏差不会过大，对实验结果影响不会过大。

3.在探究藏东南地区雪崩与气象条件关系时，由于缺乏 2011 年~2016 年间雪崩沟槽的地形数据，直接使用了雪崩沟槽当地或最邻近县气象站气温数据来进行实验。这是由于雪崩一般发生于高山区，而气象站往往架设在河谷地段或亚高山区，研究人员无法获得雪崩沟槽点的气象数据，所以研究人员通常会利用回归模型来模拟雪崩沟槽的实际气温和降雪等<sup>[26]</sup>，气温可以通过当地气温直减率来获得，降雪数据则与当地降水直减率及山地地形有关，不同地形、海拔地段降雪可能会出现显著差异，因此气象站降水数据可能与实际存在较大差异，所以为了降低数据使用对实验结果的影响，笔者决定只对气象站气温数据进行分析。

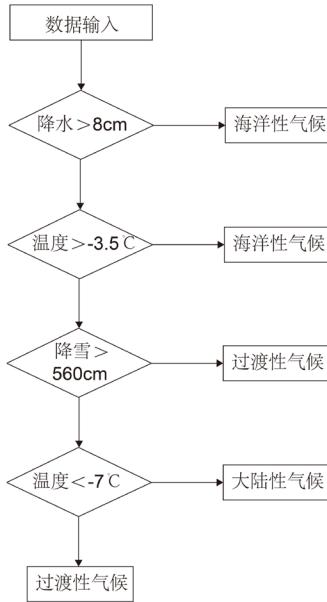


图 1 积雪气候分类标准

### 3.藏东南雪崩形成条件浅析

为了弄清藏东南地区雪崩特征，对其形成条件分析是必不可少的。雪崩形成条件包括地形条件、大气环境、积雪场性质和外部扰动，但对外部扰动的探讨不仅需要大量野外积雪场观测数据支撑，还需要对软弱层破裂机制等有着深刻认识，超出了笔者当前能力范围，所以笔者仅对藏东南地形条件、大气环境和积雪场性质进行探究。

#### 3.1 地形条件

笔者通过整理历史文献<sup>[35]</sup>，得到藏东南川藏公路八宿至墨脱段沿线雪崩沟槽点 61 处（见图 2），30 处沟槽形成区坡度信息，对区域谷歌地形进行空间分析得到 61 处对沟槽坡向信息，下文对坡度、坡向分别进行统计分析。

##### 3.1.1 坡度分析

对形成区坡度数据统计发现，雪崩沟槽形成区坡度范围在  $20^{\circ}$ ~ $47^{\circ}$  之间，坡度平均值为  $37^{\circ}$ ，中位值为  $38.5^{\circ}$ 。坡度为  $20^{\circ}$ ~ $25^{\circ}$  的雪崩沟槽共 1 处，占 3.33%；坡度为  $25^{\circ}$ ~ $30^{\circ}$  的雪崩沟槽共 5 处，占 16.67%；坡度在  $30^{\circ}$ ~ $35^{\circ}$  之间的雪崩沟槽共 7 处，占 23.33%；坡度在  $35^{\circ}$ ~ $40^{\circ}$  范围的雪崩沟槽共 7 处，占比最大，达 23.33%；坡度范围在  $40^{\circ}$ ~ $45^{\circ}$  之间的雪崩沟槽共 8 处，占 26.67%；坡度为  $45^{\circ}$ ~ $50^{\circ}$  的雪崩沟槽共 2 处，占 6.67%，该区域不存在坡度  $< 20^{\circ}$  和  $> 50^{\circ}$  的雪崩沟槽。

该区雪崩沟槽坡度表现出明显的集中分布特征，坡度在  $30^{\circ}\sim45^{\circ}$  范围内的雪崩沟槽约占雪崩沟槽总数的 75%，这表明此坡度范围雪崩爆发频率最高，同时也验证了坡度与山坡积雪稳定性之间有着密切联系：在降雪充足的前提下，坡度较小时，积雪物质能够在山坡堆积，但是较小的坡度不能提供足够的下降动力，使雪体克服剪切应力以及下垫面摩擦力而发生运动，而当坡度较大时，新雪在山坡沉降时会受山坡堆积休止角限制，无法堆积过厚，导致雪崩缺乏物质来源而不易发生。

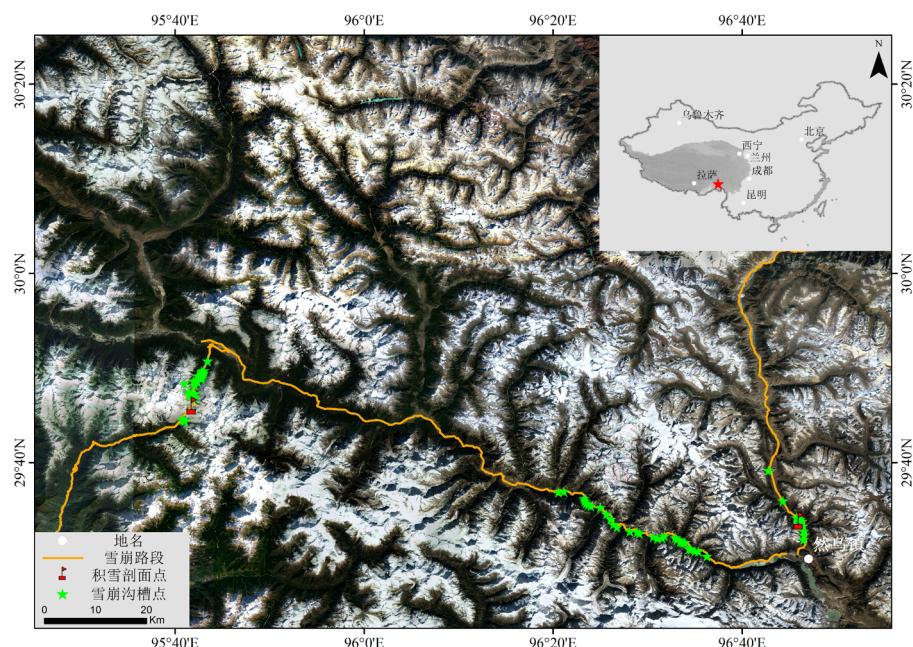


图 2 雪崩沟槽点分布

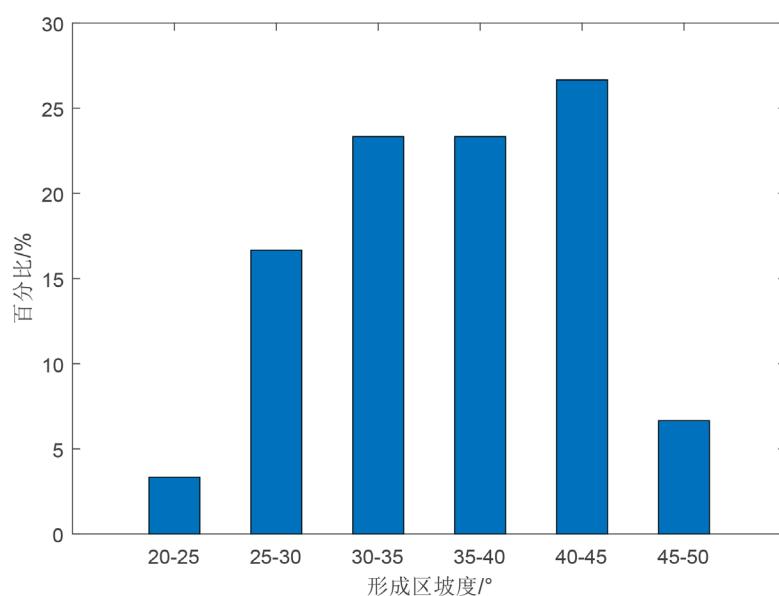


图 3 雪崩沟槽形成区坡度百分比分布

### 3.1.2 坡向分析

对该区 61 处雪崩沟槽坡向分布进行统计,发现北坡坡向的雪崩沟槽数量最多(见图 4),达 13 处,占雪崩沟槽总数的 27%,而西坡和南坡坡向雪崩沟槽数量最少,仅 3 处,占雪崩沟槽总数的 5%,同时雪崩沟槽坡向呈现出明显的差异分布,即阴坡(北、西北和东北)雪崩沟槽数量远远大于阳坡(西南、南和东南),达三倍之多。

笔者认为坡向对雪崩形成影响主要体现在山坡接受太阳辐射的差异上。阳坡积雪场受太阳辐射作用时间长,吸收的热量多,不利于积雪的积累,积雪分布范围小且深度浅,而阴坡有利于积雪积累,因而积雪范围广且深度大,导致雪崩的发生难度存在差异;另外,阴阳坡还可能导致积雪场温度梯度的存在差异,影响软弱层的形成发育,因此坡向对于雪崩形成的作用机制还值得进一步探究,这也说明在雪崩研究中,坡向是一个不容忽视的地形要素。

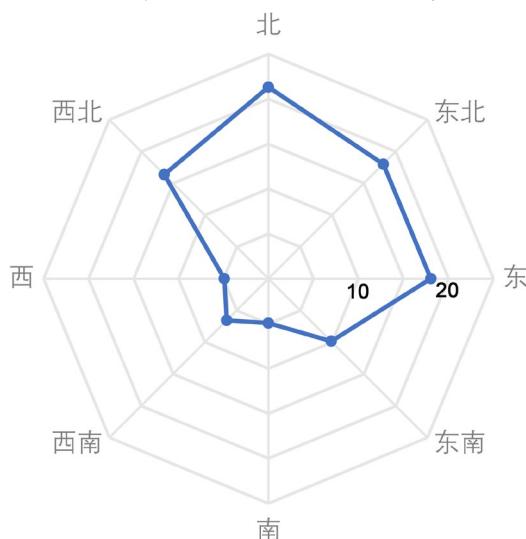


图 4 雪崩沟槽坡向统计百分比

## 3.2 气象气候条件

雪崩形成与大气环境息息相关,大气环境直接影响积雪的时空分布及物理性质,长期的积雪气候是雪崩发育的基础,而气象条件是雪崩爆发的重要扰动因子。

### 3.2.1 短期气象条件分析

笔者通过搜集资料得到 2011~2016 年期间发生在藏东南地区的 5 起自然雪崩事件(见表 1),研究表明雪崩事件与雪崩前 3 日气温、降水之间存在显著相关性<sup>[26]</sup>,因此笔者选取了雪崩事件前 3 日日均温数据进行验证。分析结果显示,前 3 日气温均不同程度地呈现出上升趋势(见图 5),笔者猜想藏东南地区雪崩

可能也存在类似性质，但由于数据偏少，其相关关系仍待进一步检验。

该区灾难性雪崩事件还表现出明显的季节特征，多发生于冬春季，笔者认为这与高降雪和高温环境有关。在冬季，尽管该区为海洋性气候区，通常不具备形成软弱层的温度梯度条件，但前文提及冬季新降雪也能形成软弱层，因此在冬季多降雪的情况下，积雪场易形成软弱层，发生雪崩；而在春季，在经过整个冬季的积累后，春季积雪场雪层厚度较大，同时积雪场温度也较高，积雪场表层降水和融化的雪水会向下渗透，破坏雪晶之间的联结作用，并会在下部雪层间起到润滑作用，导致积雪场稳定性降低从而发生雪崩，因此春季雪崩类型多为湿雪崩，也说明冬春季为最需警惕的防范雪崩灾害的季节。

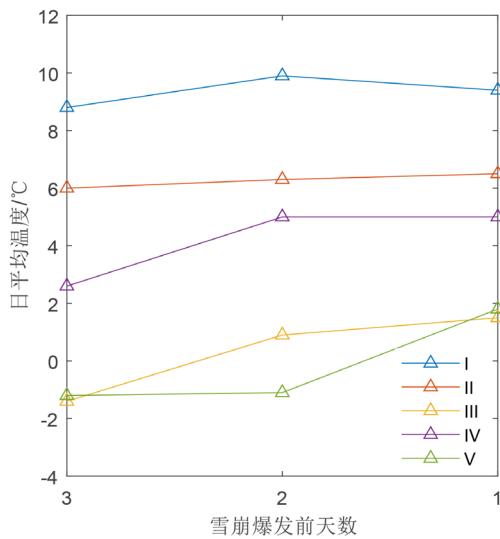


图 5 雪崩事件与温度变化趋势

### 3.2.2 积雪气候类型

对藏东南 10 个气象站点 1981~2010 年的累年日气温、降水均值数据分析（见图 6），结果显示藏东南多年平均气温为  $7.50^{\circ}\text{C}$ ，温度最高站点能达  $12^{\circ}\text{C}$ ，多年平均降水量为  $596\text{mm}$ ，个别站点能达到  $891.6\text{mm}$  左右，降水丰沛，笔者认为这与其独特的地理位置有关，印度洋水汽翻过喜马拉雅山脉，沿雅鲁藏布江河谷到达藏东南，给该区带来了大量温暖湿润的水汽，使得其降水远超周边地区<sup>[41]</sup>（见图 7 红线区域），这是该区雪崩发育的气候基础，使得该区积雪场含水量普遍较高，湿雪崩极度发育<sup>[42]</sup>。另外，南部降水较多站点海拔均在  $3000\text{m}$  以下，北部站点则呈现出先减小后增加趋势，这与藏东南地区水汽通道认知相符，沿水汽通道运移路径降水出现逐渐减小趋势，但在到达路径终点时出现了增加趋势，且北部站点海拔较高，因此笔者认为这可能与地形抬升对水汽作用有关。

为了定量研究藏东南积雪气候类型，笔者对该区积雪气候进行分类，分类标准及流程见处理方法，分类结果见表 2。结果显示，除丁青和类乌齐气象站积

雪气候类型为过渡性气候外(见图6),其余气象站均为海洋性气候,因此笔者认为藏东南地区整体为海洋性气候区,积雪场具备海洋性气候区性质,表现出温暖湿润的特点,而一般海洋性气候区雪崩爆发主要与积雪场载荷迅速增加引起的雪层破裂有关,因此在藏东南地区开展雪崩防治时需要尤其注意高频降雪及风吹雪等事件。

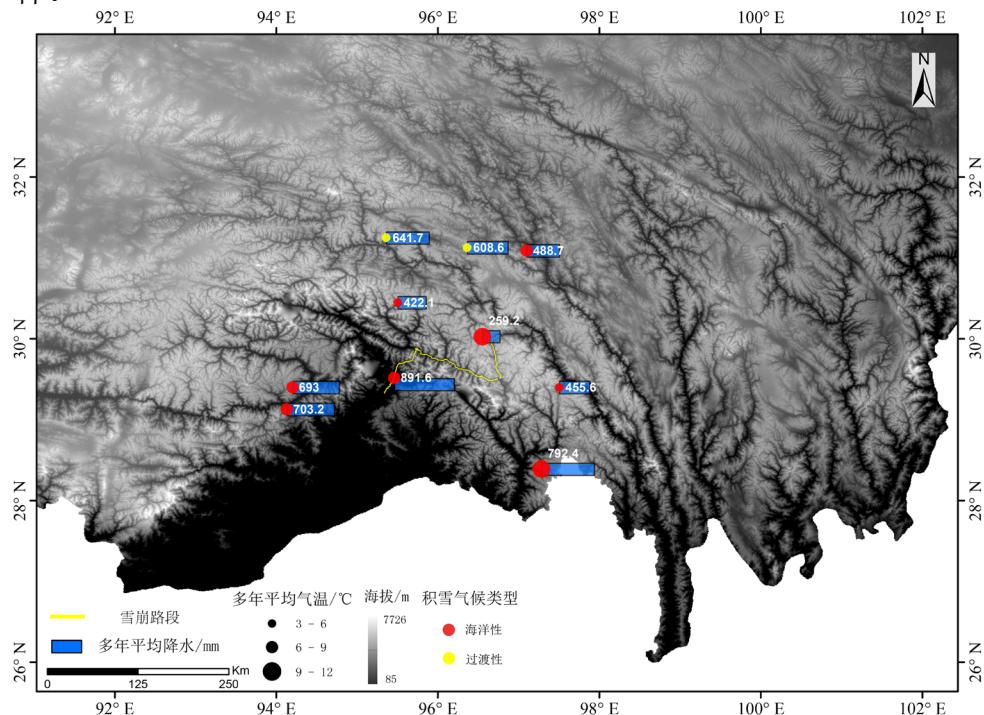


图6 藏东南地区1981~2010年气象站点多年平均气温分布

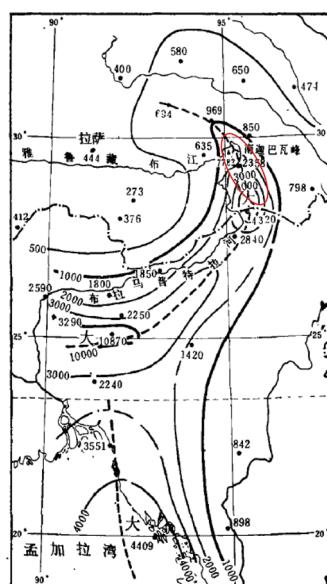


图7 藏东南地区水汽通道(改自文献[41])

### 3.3 积雪场性质分析

通常雪层剪切强度会随硬度增加而增加,但由于软弱层等重要雪层太薄,不易进行硬度测试,因此在野外测试中常采用徒手测试(hand test)来获得雪层硬度,其原理为:相同条件下,通过改变与雪体的接触面积来近似判断雪层硬度,由硬至软可分为铅笔、一指、四指和拳四种等级。本文使用的雪晶尺寸分级(见表3)和分类标准(见表4)都参照国际雪冰委员会(ICSI)制定的分类标准<sup>[43]</sup>,其中尺寸分级以雪晶最大半径或长度雪晶作为雪晶尺寸判断依据,由小到大分为1~6级,雪晶类型分类及其代表符号的使用主要是为了便于野外记录和研究的通用性。

表3 ICSI 雪晶尺寸分级标准

雪晶等级	最大直径或长度 (mm)
1	<0.2
2	0.2~0.5
3	0.5~1.0
4	1.0~2.0
5	2.0~5.0
6	>5.0

2019年3月对然乌镇和噶龙寺两处积雪场(见图2)进行野外测试,对其雪深、雪层硬度、雪晶类型和雪晶尺寸等分别进行测试,得到其积雪剖面图(见图8、图9),其中雪深指标可用于判断是否有足够的降雪覆盖下垫面的植被和地形来启动雪崩,同时还可监测积雪的沉降过程以及计算雪崩雪量规模,而雪层强度、雪晶类型及雪晶尺寸等指标可以用于研究积雪场雪层强度,研究积雪场的不稳定性。

表4 ICSI 雪晶分类系统

雪晶特征	符号	雪晶特征	符号
圆形颗粒	•	冰体	—
圆化的雪晶	□	表层沉积和壳	△
杯型雪晶; 深霜	△	新雪	+
湿颗粒	○	分解、破碎的降雪颗粒	/
羽化的雪晶	▽	风吹雪形成的雪壳	=

对噶龙寺积雪场剖面分析结果显示,积雪场表层为雪层强度非常小的新雪层,且厚度大,约占雪体一半体积;69cm~77cm为雪壳层且雪晶尺寸小,强度较大,属于一指级;雪深77cm~93cm处雪层为深霜层,雪晶尺寸较大,雪层强度较小,为四指级,与雪壳层之间强度差异大,联结较弱,是十分理想的软弱层,因此积雪场不稳定性较大,易发生全层雪崩(full-depth avalanche)。

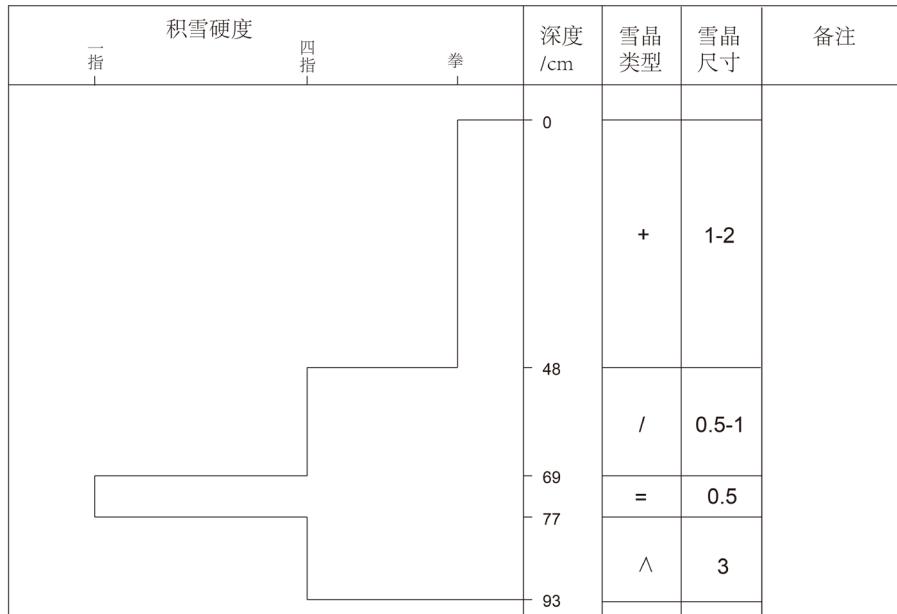


图 8 噶龙寺积雪场剖面 (海拔 3765m)

对然乌沟积雪场剖面分析结果显示,积雪场表层 12cm 雪层也为新雪层,雪层强度非常小,从积雪场表面至 69cm 深度处,雪体晶体逐渐变小,雪晶逐渐圆化,说明积雪场受正向(沿雪层底部至表面方向)温度梯度作用明显,这是由于水汽会沿温度梯度正向方向运移,而晶体凸度越小,其对水汽的吸附能力越弱,而刚沉降的雪晶通常较不规则,凸度较小,因此不规则结构雪晶会逐渐升华向上运移,并且在运移过程中还会被表面张力大雪晶吸收,增大其凸度,因此雪层由上至下表现出圆化趋势。尽管噶龙寺剖面也存在这一现象,但表现并不明显。同时然乌沟底部也存在深霜层,且有树枝。我们知道,森林会阻碍积雪场软弱层的连续性发育,降低雪崩发生概率,但研究人员在野外测试时发现,树枝对下部深霜层起到了抬升作用,导致积雪场在该处坡度较大,形成了类似“陡坡”的应力集中区,软弱层极易在该处发生断裂,反而增加了积雪场的不稳定性,发生全层雪崩概率较高。

对藏东南春季两处积雪场剖面分析结果表明,该区春季积雪场底部存在深霜层,雪层强度小,极易发生全层雪崩,且不同区域下垫面差异也会对积雪场性质造成影响,其作用不容忽视;而且春季积雪场表层都存在较厚的新雪层,易诱发软弱层破裂,发生新雪雪崩。

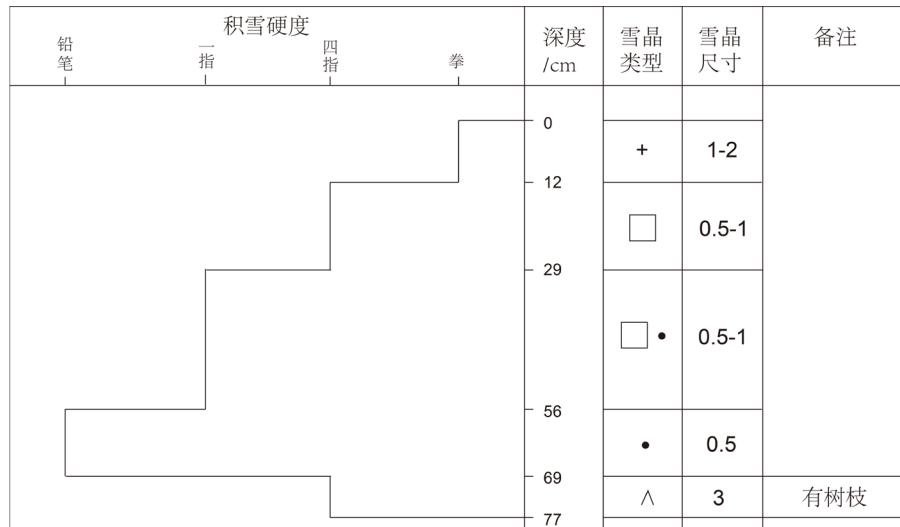


图 9 然乌沟积雪场剖面 (海拔 4283m)

通过上文对藏东南雪崩形成条件分析, 对区域雪崩特征有了一定认识, 其主要表现出以下特征:

- (1) 整体为海洋性积雪气候, 降雪量大, 温度较高。
- (2) 积雪场厚度较厚, 雪崩量大。
- (3) 多爆发于冬春季, 冬季雪崩类型以新雪雪崩为主, 春季雪崩类型以湿雪雪崩、深霜全层雪崩和新雪雪崩为主。

## 4. 结论与展望

### 4.1 结论

藏东南以其独特的自然地理环境为区域雪崩发育提供了有利条件, 其频发的雪崩灾害, 造成了当地严重的人员伤亡和财产损失, 严重限制了山区经济社会发展。同时当前学者对藏东南区域雪崩研究较少、认识不足, 故笔者利用 Google Earth 数据、国家气象中心数据以及实地观测数据分析了藏东南雪崩与自然地理因素之间的关系, 得到以下结论:

- (1) 区域雪崩沟槽坡度、坡向呈现出明显的差异分布, 雪崩沟槽形成区坡度主要分布于  $30^{\circ}\sim45^{\circ}$ , 阴坡 (西北、北和东北) 坡向达阳坡 (西南、南和东南) 坡向三倍之多, 可能主要与雪崩启动动力和积雪场接受太阳辐射时间长短有关。
- (2) 整体为海洋性积雪气候区, 降雪量大, 气温较高, 雪崩多发生与冬春季, 冬季雪崩类型以新雪雪崩为主, 春季雪崩类型以湿雪雪崩为主, 雪崩爆发可能与前 3 日的升温事件密切相关, 但仍需进一步验证。

(3) 该区春季积雪场深度较大, 表层新雪层较厚, 底部存在软弱层, 具备发育全层雪崩和新雪雪崩条件。

综上, 藏东南地区雪崩表现出降雪量大、积雪场厚度较厚、雪崩量大等特点, 多爆发于冬春季, 冬季雪崩类型以新雪雪崩为主, 春季雪崩类型以湿雪雪崩、深霜全层雪崩和新雪雪崩为主。

## 4.2 展望

尽管本文对区域雪崩与其自然地理因素进行了简单探究, 对区域雪崩沟槽地形条件、气候气象条件和积雪场性质都有了一定认识, 但仍然存在较多不足, 其中雪崩发生与升温事件之间的关系还需要更多数据验证, 对于区域软弱层破裂形成、传播等过程认识不足等, 因此未来需要对区域开展更多的野外考察和气象观测工作, 同时笔者计划未来对区域开展系统性雪崩编目工作, 更为系统且深入的认识区域雪崩机制, 促进未来雪崩的定量化研究和预测模拟。

## 参考文献

- [1] Mcclung D, Schaefer P. The avalanche handbook[M]. 3rd ed. Seattle: The Mountaineers Books, 2006.
- [2] 崔鹏, 陈容, 向灵芝, 等. 气候变暖背景下青藏高原山地灾害及其风险分析[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(2): 103-109.
- [3] Ballesteroscano J A, Trappmann D, Madrigalgonzález J, et al. Climate warming enhances snow avalanche risk in the Western Himalayas[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(13): 3410-3415.
- [4] Castebrunet H, Eckert N, Giraud G, et al. Projected changes of snow conditions and avalanche activity in a warming climate: the French Alps over the 2020-2050 and 2070-2100 periods[J]. Cryosphere, 2014, 8(5): 1673-1697.
- [5] 崔鹏, 苏凤环, 邹强, 等. 青藏高原山地灾害和气象灾害风险评估与减灾对策[J]. 科学通报, 2015, (32): 3067-3077.
- [6] 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等. 专题: 青藏高原综合科学的研究进展——从青藏高原到第三极和泛第三极[J]. 中国科学院院刊, 2017, (32): I0006.
- [7] 邓养鑫. 西藏古乡地区的雪崩及其在高山自然地理过程中的作用 [J]. 地理学报, 1980, (3): 242-250.
- [8] 王彦龙, 邵文章. 川西、滇北、藏东南雪害的初步研究[J]. 山地学报, 1983, (4): 19-23.
- [9] 王世金, 任贾文. 国内外雪崩灾害研究综述[J]. 地理科学进展, 2012, 31(11): 1529-1536.
- [10] Baggi S, Schweizer J. Characteristics of wet-snow avalanche activity: 20 years of observations from a high alpine valley (Dischma, Switzerland)[J]. Natural Hazards, 2009, 50(1): 97-108.
- [11] Castebrunet H, Eckert N, Giraud G J C O T P. Snow and weather climatic control on snow avalanche occurrence fluctuations over 50 yr in the French Alps[J], 2012, 8: p. 855-p. 875.
- [12] Peitzsch E H, Hendrikx J, Fagre D B, et al. Examining spring wet slab and glide avalanche occurrence along the Going-to-the-Sun Road corridor, Glacier National Park, Montana, USA[J]. Cold Regions Science Technology, 2012, 78(5): 73-81.
- [13] Hägeli P, Mcclung D M. Avalanche characteristics of a transitional snow climate—Columbia Mountains, British Columbia, Canada[J]. Cold Regions Science Technology, 2003, 37(3): 255-276.
- [14] Mcclung D M. Avalanche character and fatalities in the high mountains of Asia[J]. Annals of Glaciology, 2016, 57(71): 114-118.
- [15] Hao J S, Huang F R, Yang L, et al. Avalanche activity and characteristics of its triggering factors in the western Tianshan Mountains, China[J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(7): 1397-1411.
- [16] 李林, 陈晓光, 王振宇, 等. 青藏高原区域气候变化及其差异性研究[J]. 气候变化研究进展, 2010, 06(3): 181-186.
- [17] 徐可飘, 仲雷, 马耀明, 等. 青藏高原水汽输送的变化趋势研究[C]. 第 35 届中国气象学会年会 S3 高原天气气候研究进展, 2018.
- [18] Peitzsch E H, Hendrikx J, Fagre D B. Assessing the importance of terrain parameters on glide

- avalanche release [C]. International Snow Science Workshop, 2014.
- [19] Gleason J A. Terrain parameters of avalanche starting zones and their effect on avalanche frequency[D]. Montana State University-Bozeman, College of Letters & Science, 1996.
- [20] Rudolf-Miklau F, Sauermoser S, Mears A I. The Technical Avalanche Protection Handbook[M]. 2015.
- [21] Schweizer J, Jamieson J B. Snow cover properties for skier triggering of avalanches[J]. Cold Regions Science Technology, 2001, 33(2): 207-221.
- [22] Munter W. 3 x 3 Lawinen: entscheiden in kritischen Situationen[M]. Agentur Pohlmann & Schellhammer, 1997.
- [23] Meister R. Country-wide avalanche warning in Switzerland[C]. Proceedings International Snow Science Workshop, Snowbird, Utah, USA, 30 October-3 November 1994, 1995: 58-71.
- [24] Maltin M. The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency[J]. Cold Regions Science Technology, 2003, 37(3): 407-419.
- [25] 汶林科, 向灵芝, 蔡毅, 等. 雪崩的形成机理研究[J]. 山地学报, 2016, 34(1): 1-11.
- [26] Jomelli V, Delval C, Grancher D, et al. Probabilistic analysis of recent snow avalanche activity and weather in the French Alps[J]. Cold Regions Science Technology, 2007, 47(1): 180-192.
- [27] Birkeland K W, Mock C J, Shinker J J: Avalanche extremes and atmospheric circulation patterns, Hutter K, editor, Annals of Glaciology, Vol 32, 2001, Cambridge: Int Glaciological Soc, 2001: 135-140.
- [28] Roch A. Report on snow and avalanche conditions in the U.S.A. Western Ski Resorts from January 1st to April 24th 1949[R]. Davos , Switzerland: Federal Institute for Research on Snow and Avalanches-Weissfluhjoch-Davos of Switzerland, 1949: 1-39.
- [29] Armstrong R L, Armstrong B R. Snow and avalanche climates of the western United States: A comparison of maritime, intermountain and continental conditions[J]. Iahs Publication, 1986.
- [30] Mock C J, Birkeland K W. Snow Avalanche Climatology of the Western United States Mountain Ranges[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(10): 2367-2392.
- [31] Jamieson B, Johnston C D. Snowpack factors associated with strength changes of buried surface hoar layers[J]. Cold Regions Science Technology, 1999, 30(1-3): 19-34.
- [32] Schweizer J. Review of dry snow slab avalanche release[J]. Cold Regions Science Technology, 1999, 30(1-3): 43-57.
- [33] Reiwege I, Mayer K, Steiner K, et al. Measuring and localizing acoustic emission events in snow prior to fracture[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 110: 160-169.
- [34] Perla R I, Lachapelle E R. A Theory of Snow Slab Failure[J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75(36): 7619-7627.
- [35] 王彦龙. 川藏公路沿线雪害与防治[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [36] 新华网. 雪宝顶雪崩山难[EB/OL]. [2011-10-03]. <https://sports.qq.com/a/20111003/00058.htm>.
- [37] 人民网-西藏频道. 西藏日喀则雪灾[EB/OL]. [2013-10-16]. <http://xz.people.com.cn/n/2013/1016/c138901-19706940.html>.
- [38] 人民网. 西藏吉隆雪崩 2 人遇难[EB/OL]. [2015-02-17]. <http://society.people.com.cn/n/2015/0227/c136657-26602535.html>.
- [39] 民政部救灾司. 西藏边坝县雪崩致 2 人死亡[EB/OL]. [2015-04-16]. <http://abjz.scjz.gov.cn>

- n/zqkx/gnzq\_jz/201504/t20150416\_29078.html.
- [40] 中国新闻网. 四川甘孜州石渠县尼呷镇发生雪崩[EB/OL]. [2015-04-23]. <http://www.mn.w.cn/news/shehui/894465.html>.
- [41] 杨逸畴, 高登义, 李渤生. 雅鲁藏布江下游河谷水汽通道初探[J]. 中国科学, 1987, (8): 97-106.
- [42] 王彦龙. 我国危害性较大的湿雪雪崩[J]. 冰川冻土, 1986, (01): 52-60+97-98.
- [43] Colbeck S C. The international classification for seasonal snow on the ground[M]. The Internat. Commission on Snow and Ice of the International Association of Hydrological Sciences, 1985.

## 致 谢

转眼之间，四年大学生活已接近尾声，我即将步入人生的下一个阶段，在此我想向我的老师、同学、母校表达由衷的感谢。

首先衷心感谢姚檀栋老师对我的指导，姚老师在我的论文选题、开题及未来研究方向都给予了悉心指点，让我对雪崩研究有一个初步认识，再次对姚老师致以诚挚的感谢。

感谢汶林科老师在我进行毕业设计期间对我的指导和帮助，正是他的帮助，我才能顺利理解并完成毕业论文的实验方向，同时感谢青藏所陈文锋师兄、戴玉凤师姐在我搜集数据和论文写作时给予的帮助。

感谢我的班主任耿豪鹏老师，他在我大学期间提供了许多帮助和指导，受益匪浅。另外，我还要感谢大学期间各位认真负责的教学老师，您们的博闻强识和精神品质时刻感染着我，激励我不断学习提升自我，这必将在以后的人生道路中发挥重要的作用。

感谢我的各位同学、朋友，我们在一起度过的四年大学时光将是我人生中最为宝贵的一段经历，在这四年之中，我们共同学习、共同进步、共同见证彼此的成长，愿此去前程似锦，再相逢依旧如故。

最后，感谢我的母校兰州大学对我的悉心栽培，为我提供了宝贵学习平台，祝愿母校永远朝气蓬勃，桃李满天下！

邬俊飞  
2019年4月20日

### 论文（设计）成绩

导师评语

建议成绩 \_\_\_\_\_ 指导教师（签字）\_\_\_\_\_

答辩小组意见

答辩委员会负责人（签字）\_\_\_\_\_

成绩 \_\_\_\_\_ 学院（盖章）\_\_\_\_\_

年 月 日