

西藏南部暴雪气候特征及预报指标研究

方祥聪¹, 方祥贵², 黄丹¹, 方祥超³, 刘开宇⁴, 刘俊卿^{5*}

¹民航西藏空管中心, 西藏 拉萨

²西藏那曲市气象局, 西藏 那曲

³茅台机场, 贵州 遵义

⁴民航贵州空管分局, 贵州 贵阳

⁵西藏自治区气象局, 西藏 拉萨

收稿日期: 2024年6月14日; 录用日期: 2024年7月17日; 发布日期: 2024年7月24日

摘要

利用1981~2014年降水、积雪、环流场和物理量资料对西藏南部暴雪的气候特征及预报指标进行分析。结果表明: 西藏南部暴雪主要集中在初冬和春初, 各地10月~次年5月均可出现暴雪; 聂拉木、帕里和错那呈双峰分布, 普兰和隆子呈单峰分布。在年变化方面, 错那和帕里暴雪日数呈略微增多趋势, 聂拉木和普兰呈减少趋势, 隆子基本不变。影响西藏南部暴雪的天气系统为南支槽、孟湾风暴与南支槽配合两大类型。高空急流、水汽条件与西藏南部暴雪天气密切相关。暴雪落区一般位于湿中心或湿中心西侧比湿梯度大值区, 且水汽通量梯度大值区一侧通常伴有低空西南急流带。暴雪落区通常垂直上升运动较强, 400与200 hPa散度差值越大, 降雪强度越大。能量大值区梯度增大(减弱)与暴雪过程开始(结束)有很好的对应关系。

关键词

西藏南部, 暴雪, 气候特征, 预报指标

Study on Climate Characteristics and Forecast Index of Heavy Snowfall in the Southern of Xizang

Xiangcong Fang¹, Xianggui Fang², Dan Huang¹, Xiangchao Fang³, Kaiyu Liu⁴, Junqing Liu^{5*}

¹Xizang Air Traffic Management Center of Civil Aviation, Lhasa Xizang

²Naqu Meteorological Service, Naqu Xizang

³Moutai Airport, Zunyi Guizhou

⁴Civil Aviation Guizhou Air Traffic Management Bureau, Guiyang Guizhou

*通讯作者。

文章引用: 方祥聪, 方祥贵, 黄丹, 方祥超, 刘开宇, 刘俊卿. 西藏南部暴雪气候特征及预报指标研究[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(4): 999-1008. DOI: 10.12677/ccrl.2024.134115

⁵Xizang Autonomous Region Bureau of Meteorology, Lhasa Xizang

Received: Jun. 14th, 2024; accepted: Jul. 17th, 2024; published: Jul. 24th, 2024

Abstract

Based on the rainfall data, circulation field and physical variables from 1981 to 2014, the climatic characteristics and prediction indexes on heavy snowfall in the southern of Xizang are studied. The results show that heavy snowfall on southern Xizang can occur from October to May of the following year, and mainly in early winter and early spring, its monthly change of the snowstorm shows a significant twin-peak feature. Cuona and Pali increased slightly in the climate trend of snowstorm days, Nielamu and Pulan showed a decrease, Longzi basically unchanged. The weather system affecting the snowstorm in the southern Xizang is composed of South Trough and Bay of Bengal Storm. Heavy snow in southern Xizang is closely related to upper-level jet stream and water vapor conditions. The snowfall region is generally located in the moist center or the larger wet gradient in the west area and in the high value region of water vapor flux gradient with the southwest low-level rapids in 500 hPa. Generally, the vertical upward movement in the snowstorm falling area is strong, and there is a convergence in the lower layer and divergence in the lower layer. The greater the difference of divergence between 400 hPa and 200 hPa is, the heavier the snow is. The increase (weakening) of the gradient in the energy high value area corresponds well to the beginning (end) of the blizzard process.

Keywords

Southern Xizang, Heavy Snowfall, Climate Characteristics, Forecast Index

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

暴雪作为高原牧区冬季雪灾的最直接诱因，每年或多或少都会出现[1]。暴雪给农牧业生产带来巨大损失，对交通和人民生活产生巨大影响，其预报预警研究对气象服务有着十分重要的意义。目前国内不少气象工作者对暴雪气候特征和预报技术进行了研究，庄晓翠等[2]指出，阿勒泰地区冬季大到暴雪具有明显的年代际变化特征，长期变化趋势均呈显著的线性增多趋势，暴雪频率及贡献率的变化是造成该地区冬季降雪量发生变化的内在因素。陈海山等[3]研究发现，中国北方冬季暴雪发生频次较高区域主要位于东北，在空间分布上呈现由西北向东南增加的态势，且存在明显的年代际变化特征。高玉中等[4]研究表明，低涡是黑龙江省暴雪的主要影响系统。很多研究从天气诊断分析角度对各地暴雪发生的水汽、动力等物理量预报指标进行了研究，认为深厚的湿层和强烈的水汽辐合为暴雪提供了充沛的水汽条件，“高空辐散、低空辐合”以及强劲的上升运动是暴雪的动力条件[5]-[26]。青藏高原作为我国积雪最丰富的三大区域之一，其强降雪天气的系统研究主要集中在高原东部[27]-[32]，西藏多以气候特征和天气个例分析居多。气候研究人员分析青藏高原大到暴雪天气的气候特征发现，高原大到暴雪主要环流形势分为：印度低压型、南北支槽型、巴尔喀什湖低压型、伊朗高压型和高原低涡-切变型[33] [34] [35]。近十年，随着多模式数值预报产品在青藏高原气象业务的深入应用，西藏暴雪天气过程个例诊断分析较多[36]-[40]，

而暴雪预报指标的凝炼工作还没有开展。

西藏暴雪强度以南部为最，西藏南部涵盖了高原的两个雪灾高频中心，即以聂拉木为中心的喜马拉雅山脉中段区和以错那为中心的喜马拉雅山脉东段区；该区域雪灾以中灾和重灾为主，其中喜马拉雅山脉中东段中灾和重灾频率都达到 25%，占总数 3/4 [41]，因此西藏南部暴雪气候特征和预报指标分析研究十分必要。就目前而言，针对西藏南部暴雪的研究以天气个例分析为主，气候特征和预报技术的研究较少，而且缺乏系统的分析。因此，开展西藏南部暴雪气候特征和预报指标分析，可为今后暴雪预报提供思路和着眼点，进而提升西藏南部地区雪灾天气的防御能力。

2. 资料及方法

2.1. 研究区概况

根据中国气象地理区划[42]，西藏南部位于我国西南边陲，南与尼泊尔、不丹、锡金、印度四国接壤，西起阿里普兰县，东至山南隆子县，地理位置 80°E~94°E，26.8°N~29°N，面积约 13.13 万平方公里[43]，涵盖阿里地区东南部、日喀则市南部和山南市南部的喜马拉雅山中段生态屏障区，地貌以高原、山地和河谷为主，平均海拔高度在 4000 米以上，8000 米以上的山峰达 11 座。与地形地貌相对应，西藏南部气候类型多样，区域差异和垂直变化十分明显，由于山峦重叠、河流纵横、湖泊星罗棋布，形成了多种多样的区域气候以及明显的垂直气候带。喜马拉雅山北坡地势平缓，降水较少，年降水量在 400 mm 左右，以植物种类单一的高寒草原为主；南坡地势陡峻，雨量充沛，冬季多暴雪，年降水量在 600 mm 以上，以生物种类丰富多样的亚热带常绿林为主。

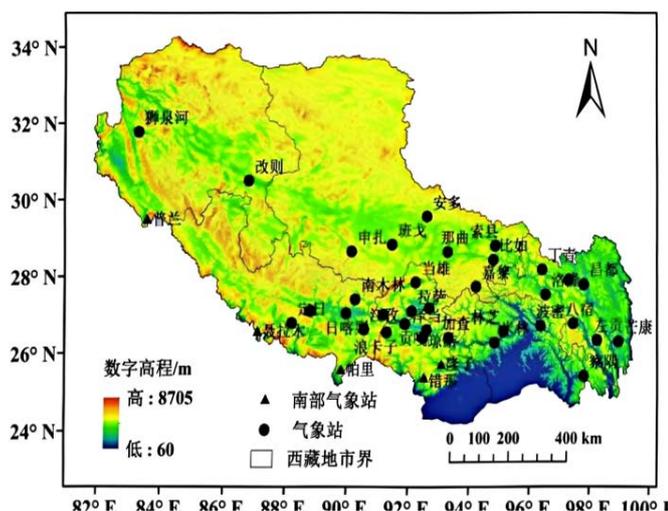


Figure 1. Distribution of meteorological stations on the southern Xizang
图 1. 西藏南部地理位置及气象站点分布

2.2. 资料与方法

2.2.1. 资料来源

利用西藏南部(即阿里的普兰、日喀则的聂拉木和帕里、山南的错那和隆子) 5 个气象观测站(图 1 中三角符号标注) 1981~2014 年地面降水、积雪和温度资料，以日降水量 ≥ 10 mm，同时积雪深度 ≥ 5 cm、日平均温度 $\leq 0^\circ\text{C}$ 来判断暴雪日[43]，分析西藏南部暴雪的气候特征；同时运用 1981~2014 年暴雪天气的环流形势场及 T639 物理量资料，基于 GIS 的格点精细化预报插值方法，计算 5 个站点的预报诊断物理量。

2.2.2. 预报方法

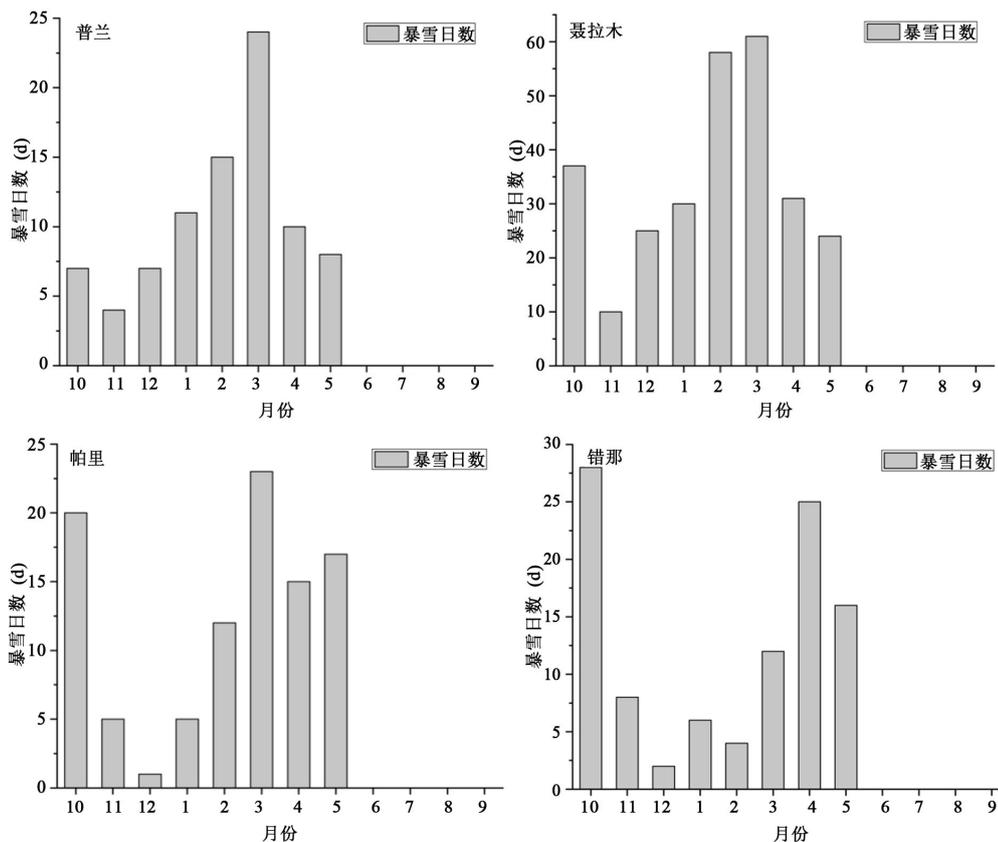
对暴雪过程的热力、水汽、动力条件的物理量进行统计，根据各物理量对暴雪重要程度确定其权重系数，选取暴雪过程中与降水关系密切且物理意义明确的多个物理量作为可发生暴雪天气的预报临界指标值[44]，建立西藏南部暴雪预报方程；重新将每个预报因子代入预报方程，选取概括全部历史个例的 Y 值为临界值 YC ；当 500 hPa 环流场满足暴雪天气形势，且方程 Y 值大于临界值 YC 时，则预报未来 24 h 将出现暴雪天气。

3. 西藏南部暴雪气候特征

3.1. 西藏南部暴雪月变化

分析 1981~2014 年西藏南部各站暴雪日数月变化(图 2)发现，各地 10 月~次年 5 月均有暴雪出现，普兰和聂拉木基本呈单峰分布，帕里错那和隆子呈双峰分布。

帕里和错那暴雪日数峰值出现在 3~4 月和 10 月，帕里主峰值 3 月的暴雪日数为 23 天，次峰值 10 月的暴雪日数为 20 天；错那主峰值 10 月的暴雪日数为 28 天，次峰值 4 月的暴雪日数为 25 天；隆子暴雪日数较少，峰值 10 月暴雪日数为 7 天，5 月为 4 天。帕里和错那谷值出现在 12 月，分别出现 1 天和 2 天的暴雪天气，而隆子 1~3 月几乎没有暴雪出现。聂拉木和普兰暴雪日数峰值出现在 3 月，暴雪日数分别为 61 和 24 天。尽管各站暴雪日数分布类型和峰值的所在月份不同，但暴雪过程均集中在初冬和春初，隆冬时期暴雪过程相对较少，这是因为该时段高原暴雪影响系统为西风带南支槽，水汽条件稍差，难以形成强降雪 [33]。西藏南部西段与东段主峰值正好相反，主要与副热带高压的位置有关，西伸至 90° 附近，高空槽的位置偏西偏北，造成普兰至聂拉木一带的强降雪；伊朗高压偏东时，造成西藏 90° 以东地区的强降雪。



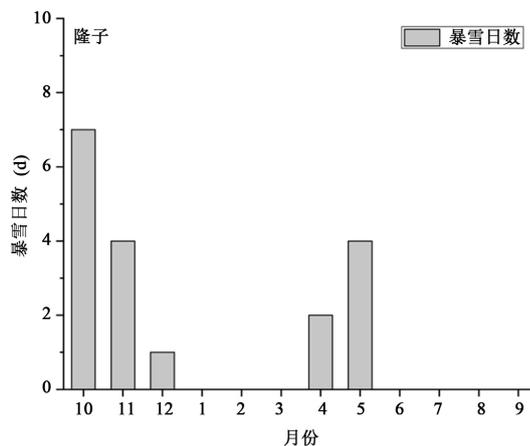
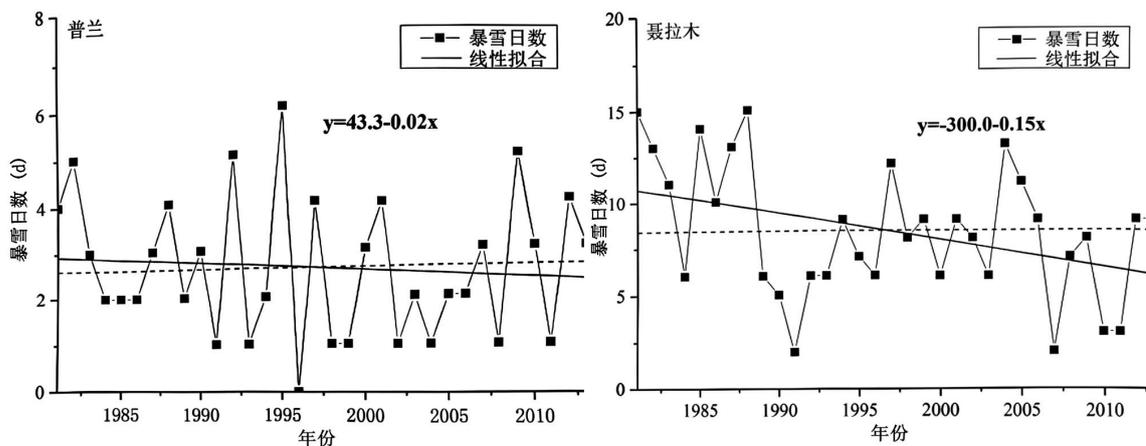


Figure 2. Monthly characters of the snowstorm days on the southern Xizang from 1981 to 2014
图 2. 1981~2014 年西藏南部各站暴雪日数月变化特征

3.2. 西藏南部暴雪年际变化

从 1981~2014 年西藏南部暴雪日数的年际变化(图 3)分析发现, 西藏南部各地暴雪日数变化趋势并不一致。东部的错那和帕里呈略微增多趋势, 其增加幅度约为 2 天/100 年左右; 西部的聂拉木和普兰的暴雪日数呈减少趋势, 各站减少幅度约为 2~15 天/100 年之间; 隆子暴雪年际变化不明显, 以上均通过了 0.05 显著性水平检验。高原南侧的低值系统为西藏南部暴雪提供水汽来源, 当副热带高压西伸明显, 低值系统位于印度半岛及以西时, 导致普兰至聂拉木一带的暴雪天气; 否则, 低值系统位于孟湾 - 中南半岛附近时, 影响南部边缘东部至林芝南部暴雪天气; 根据整理分析历年来副热带高压位置发现, 西藏南部聂拉木一带暴雪天气减少明显与自 20 世纪末以来低值系统的所在位置偏东有关。另外, 在全球变暖的背景下, 降雪转变为降雨或雨夹雪, 因此全球变暖也对聂拉木一带暴雪天气减少有一定的贡献[32]。

从西藏南部暴雪日数变化图可以看出, 1981~2014 年西藏南部平均暴雪日数为 16.7 天; 从线性拟合结果分析, 暴雪日数呈减少趋势; 从 5 阶多项式曲线可以看出, 年代际变化特征表现为: 80 年代至 90 年代初呈减少趋势, 90 年代中期至 20 世纪 00 年代变化不大, 2010 年以后呈增加趋势。近 33 年以来, 1988 年暴雪发生次数最多, 达 33 站次, 暴雪日数与近 30 年平均相比增加了 97.4%; 从各月暴雪日数分析, 1988 年 10 月和 1999 年 4 月暴雪日数偏少 20%, 其余月份偏多 2~7.8 倍。从环流场(图略)上看, 南支槽活跃, 孟加拉湾和印度洋水汽输送高于多年平均值, 导致高原南部暴雪过程频繁, 暴雪日数偏多明显。



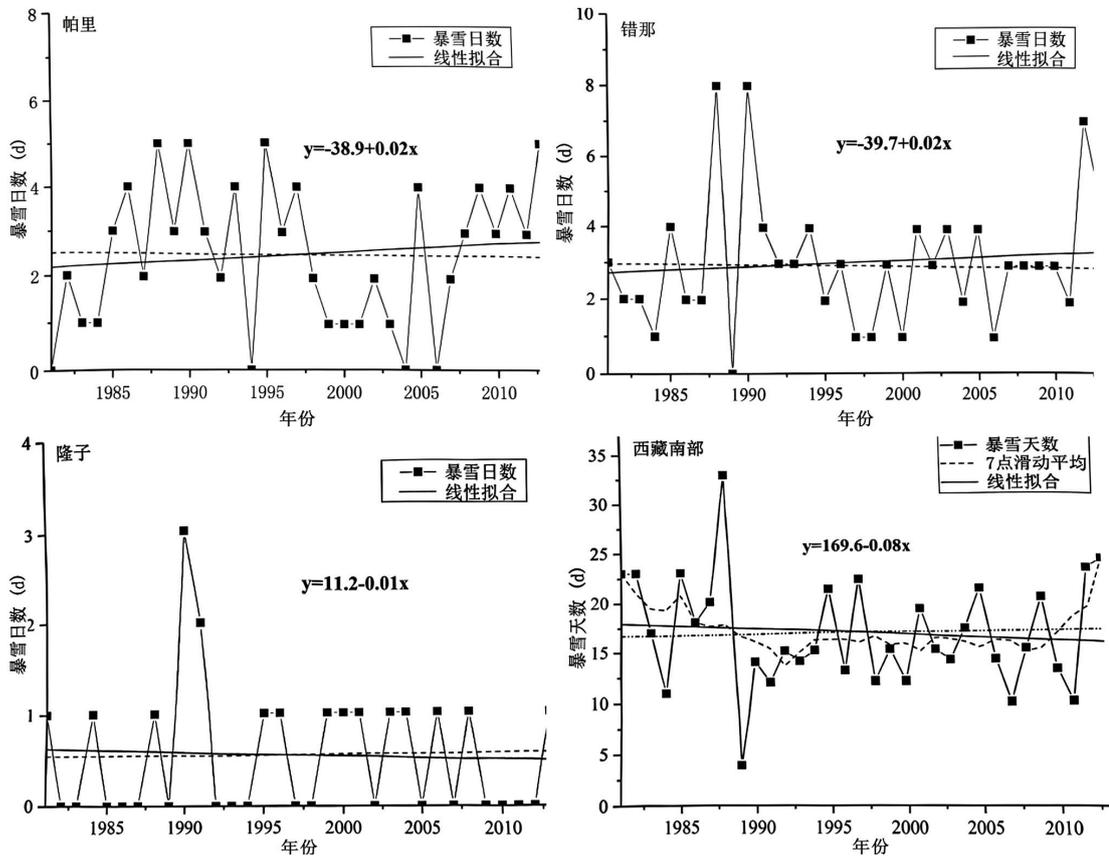


Figure 3. Interannual variation of the snowstorm days on the southern Xizang from 1981 to 2014
 图 3. 1981~2014 年西藏南部及各站暴雪日数的年际变化

4. 西藏南部暴雪影响系统分析

对 237 次暴雪过程 8:00 时 500 hPa 天气形势进行分析, 将暴雪天气形势归纳为南支槽型和孟加拉湾风暴型, 天气环流形式如图 4 所示。根据 500 hPa 高度场和地面降水实况资料, 以西藏南部范围内 1 个及以上出现暴雪为一次暴雪天气过程, 对 1981~2014 年西藏南部的暴雪过程统计分析(表 1), 1981~2014 年共有 237 次暴雪过程, 南支槽是产生西藏南部暴雪最多的天气系统, 影响的暴雪过程达 212 次, 约占 93%; 而孟加拉湾风暴和南支槽结合引发的暴雪过程 15 次, 多发生在 10~11 月及次年 5 月, 冬季后期和春季发生较少。

西藏距孟加拉湾较远, 且受高原南坡地形影响, 孟加拉湾风暴登陆后减弱, 在南支槽的引导下, 风暴外围云系携带大量水汽和能量在有利天气形势配置下在南部边缘地区形成强降雪。虽 500 hPa 上无明显的风暴环流特征, 但能影响西藏南部边缘地区出现暴雪, 1981~2014 年共出现 15 次暴雪过程, 约占全部过程的 7%, 多发生在 10~11 月及次年 5 月, 冬季后期和春季发生较少。

Table 1. Interdecadal distribution of heavy snow impact systems in southern Tibet from 1981 to 2014

表 1. 西藏南部 1981~2014 年暴雪影响系统的年代际分布

| 影响系统 | 暴雪次数 | | | | 合计 |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----|
| | 1981~1990 年 | 1991~2000 年 | 2001~2010 年 | 2011~2014 年 | |
| 南支槽型 | 66 | 67 | 57 | 22 | 212 |
| 孟加拉湾风暴型 | 4 | 3 | 6 | 2 | 15 |

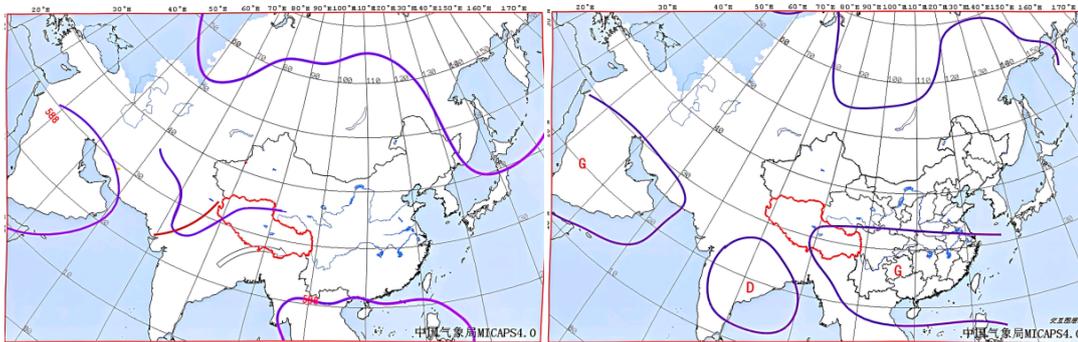


Figure 4. Conceptual model of snowstorm on the southern Xizang (left: South Branch Trough, right: Southern Branch Trough in the Subtropical Westerlies Combined with Storm over the Bay of Bengal)

图 4. 西藏南部暴雪天气概念模型(左: 南支槽型, 右: 孟加拉湾风暴和南支槽结合型)

另外, 高低空急流配置和水汽条件对暴雪天气有非常重要的作用。在 237 次西藏南部暴雪天气中, 其中 229 次伴有 20 m/s 的低空急流, 占有所有暴雪过程的 97%, 几乎每次暴雪天气都伴有 40~70 m/s 的高空急流。低空急流与南部暴雪强度无明显的相关性, 而高空急流与暴雪天气出现密切相关, 同时受高原地形的影响(表 2)。同时孟湾一带 $t-t_d$ 维持在 $4^{\circ}\text{C}\sim 8^{\circ}\text{C}$ 之间为西藏南部暴雪提供充沛的水汽。

Table 2. Distribution of upper-level jet stream and lower-level jet stream on snowstorm in the southern of Xizang from 1981 to 2014

表 2. 西藏南部 1981~2014 年暴雪过程的高空急流和低空急流的分布情况

| 影响因素 | 高空急流 | | 低空急流 | |
|-------|------|-----|------|-----|
| | 次数 | 百分比 | 次数 | 百分比 |
| 次数及比例 | 220 | 97% | 63 | 28% |

5. 西藏南部暴雪形成物理机制分析

由于 1981~2014 年 237 次暴雪过程中单一南支槽引发的暴雪占 93%, 因此以单一南支槽暴雪过程为例对西藏南部暴雪进行物理量诊断进行统计分析, 整理暴雪过程各物理量的数值范围, 形成由南支槽引发的西藏南部暴雪天气的物理量指标。

5.1. 动力特征

(1) 垂直速度(ω)。降雪发生在上升运动区。统计 1981~2014 年西藏南部发生暴雪天气过程发现, 500 hPa 以下垂直速度为正, 但 400 hPa 以上垂直速度多为负。垂直上升运动中心位于 400 hPa, 其值一般为 $-42.2 \times 10^{-2} \sim 8 \times 10^{-2} \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从垂直分布可以看出, 在暴雪天气过程区域一般整层(从 500~200 hPa)为上升运动区。(2) 散度(DIV)。低层辐合与高层辐散的有效配合使上升运动加强和维持, 有利于西藏南部地区暴雪天气的开始和维持。在 29 次暴雪过程中, $DIV_{500 \text{ hPa}} < 0$ 区域有很好的对应, 低层维持辐合状态, 其值大致为 $-6 \times 10^{-6} \sim -22 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, 500 hPa 辐合区域出现和消失的时间与降雪开始和结束的时间有较好的对应关系。从 200 hPa 散度分析可知, 29 次过程均存在高层辐散, 即 $DIV_{200 \text{ hPa}} > 0$, 其值大致为 $2 \times 10^{-6} \sim 71.6 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。散度的垂直分布特征分析发现, 暴雪天气过程发生在高层辐散远大于低层辐合的区域, 200~500 hPa 的散度差值越大, 降雪强度越强。

5.2. 热力特征

假相当位温(θ_{se})表征大气的温湿特征和垂直运动, 反映了大气中的能量分布。分析西藏南部暴雪天

气的 500 hPa 假相当位温发现。当暴雪天气发生时，500 hPa 假相当位温值大约在 38.2℃~56.9℃之间，暴雪天气过程常发生于 500 hPa 假相当位温能量大值区或梯度高值区。伴随西南气流水汽输送的增强，大气能量大值区内明显从印度半岛向东北方向扩展，西藏南部处在能量梯度高值区，能量梯度逐渐加大，暴雪过程开始；南支槽东移，西南气流输送的暖湿空气的减弱东移，能量大值区强度逐渐减弱至消失，降雪过程结束。

5.3. 水汽条件

充沛水汽的供应有利于西藏南部暴雪的发生，主要集中在 500 hPa 以下对流层的中低层。因此选取 500 hPa 比湿、500 hPa 水汽通量和 500 hPa 水汽通量散度分析水汽条件与暴雪天气过程落区的关系。(1) 500 hPa 比湿(Q)。西藏南部发生暴雪天气时，500 hPa 比湿值大致为 1~5 g·kg⁻¹。降水开始前，水汽沿中低层(600~400 hPa)西南气流向东北输送，水汽含量增加，暖湿空气带不断向高原伸展，暴雪天气过程大多数在西藏南部伴有风速辐合，暴雪天气落区多位于湿中心前部，并且≥2 g·kg⁻¹；或位于比湿大值中心或其西侧比湿梯度大值区。(2) 500 hPa 水汽通量(Q_FLUX)。西藏南部发生暴雪天气的 500hPa 水汽通量值一般为 1~6 g·s⁻¹·hPa⁻¹·cm⁻¹，为暴雪提供水汽，大多数来源于孟加拉湾或阿拉伯海，暴雪天气落区大多数位于水汽通量梯度大值区，有时位于水汽通量大值中心通常与低空西南急流配合。(3) 500 hPa 水汽通量散度(Q_DIV)。分析暴雪天气的 500 hPa 水汽通量散度可以看出，29 次过程全部发生在水汽通量散度负值区，即存在水汽辐合，其数值变化范围在 0~-14 × 10⁻⁸ g·s⁻¹·cm⁻²·hPa⁻¹之间。水汽通量散度从正变为负时暴雪开始，再次转为正值时，暴雪过程基本结束。辐合越强暴雪强度越大，暴雪天气通常出现在 500 hPa 水汽通量散度负值中心，有时出现在 500 hPa 水汽通量散度由正变为负的过渡区域。

5.4. 西藏南部暴雪预报指标分析及检验

通过上述西藏南部暴雪天气落区与各物理量分布的关系分析，总结归纳有利于西藏南部暴雪天气的物理量指标并制定其临界值(见表 3)。

Table 3. Critical value of physical variables index of blizzard on the southern Xizang

表 3. 西藏南部暴雪物理量指标临界值

| 临界值 | $Q_{500\text{ hPa}}$ (g/kg) | $Q_FLUX_{500\text{ hPa}}$ (g/s·hPa·cm) | $Q_DIV_{500\text{ hPa}}$ (g/s·cm ²) | $DIV_{500\text{ hPa}\sim 200\text{ hPa}}$ (/s) | $\omega_{400\text{ hPa}}$ (m/s) | $\theta_{se500\text{ hPa}}$ (°C) |
|--------|--------------------------------|--|---|---|------------------------------------|-------------------------------------|
| 西藏南部暴雪 | 1.8 | 1.6 | -1 | 12 | -20.3 | 44 |

西藏南部暴雪发生在高湿、大尺度上升运动、层结不稳定区域，单一的物理量不能判断是否有暴雪天气发生，需结合以上表征暴雪发生条件的各物理量指标综合判断。利用各物理量预报指标对 2015 年西藏南部四次暴雪过程进行检验(表 4)：从检验结果可以看出，个例 1 的水汽、上升运动及热力条件等各物理量对西藏南部暴雪天气形成有利，降雪强度较大；而个例 2、个例 3 和个例 4 的水汽、动力条件相对较差，降雪强度稍弱；其中个例 4 虽然水汽和热力条件较好，但是上升运动明显偏弱，因此在四次暴雪过程中降雪强度最小。

Table 4. Application test of physical variables index of blizzard in the southern Xizang

表 4. 西藏南部暴雪物理量预报指标应用检验

| 暴雪个例 | 比湿 _{500 hPa} (g/kg) | $Q_FLUX_{500\text{ hPa}}$ (g/s·hPa·cm) | $Q_DIV_{500\text{ hPa}}$ (g/s·cm ²) | $DIV_{500\text{ hPa}\sim 200\text{ hPa}}$ (/s) | $\omega_{400\text{ hPa}}$ (m/s) | $\theta_{se500\text{ hPa}}$ (°C) | 站点日降水量(mm) | |
|-------------|---------------------------------|--|---|---|------------------------------------|-------------------------------------|------------|------|
| | | | | | | | 聂拉木 | 普兰 |
| 1. 20150101 | 2 | 4 | -3 | 47 | -35 | 55 | 62.7 | 32.8 |
| 2. 20150225 | 1 | 2 | -1 | 20 | -26 | 53 | 25.0 | 26.1 |

续表

| | | | | | | | | |
|-------------|---|---|----|----|-----|----|------|------|
| 3. 20150301 | 2 | 2 | -1 | 43 | -17 | 55 | 31.0 | 16.2 |
| 4. 20150412 | 3 | 2 | -1 | 12 | -15 | 60 | 24.7 | 10.4 |

6. 结论

利用 1981~2014 年降水资料、环流场及物理量资料对西藏南部暴雪的气候特征及预报指标进行了分析, 结果表明:

(1) 西藏南部各地冬半年 10 月~次年 5 月均可出现大到暴雪, 西段暴雪日数特征基本呈单峰分布, 东段呈双峰分布。在变化趋势方面, 除错那和帕里呈略微增多趋势外, 其余各地暴雪次数总体呈减少趋势, 各站减少幅度约为 0.5~15 d/100 年, 西藏南部暴雪减少与全球变暖的气候背景有关。

(2) 影响西藏南部暴雪的主要天气系统为: 单一南支槽和孟湾风暴与南支槽配合两大类型; 高空急流和充沛的水汽条件与西藏南部暴雪强度密切相关, 可以作为西藏南部暴雪天气的预报依据。

(3) 在动力和热力条件方面, 暴雪落区通常伴随较强的上升运动区, 400 hPa 辐合区域出现和消失的时间与降雪开始和结束的时间有较好的对应关系; 高层辐散远大于低层辐合差值越大, 降水越强。暴雪落区能量大值区梯度逐渐加大标志着暴雪过程开始, 能量大值区梯度逐渐减弱至消失, 降雪过程结束。

(4) 在水汽条件方面, 暴雪落区一般位于 500 hPa 湿区或湿区西侧比湿梯度大值区, 且水汽通量梯度大值区一侧, 通常伴有低空西南急流带, 或分布在 500 hPa 水汽通量散度负值中心或由正变为负的过渡区域。

基金项目

国家重点研发计划(2016YFC203303)资助。

参考文献

- [1] 戴加洗. 青藏高原气候[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 261-264.
- [2] 庄晓翠, 田忠锋, 李博渊. 新疆阿勒泰地区冬季日降雪特性指标变化分析[J]. 干旱区研究, 2014, 31(3): 463-471.
- [3] 陈海山, 罗江珊, 韩方红. 中国北方暴雪的年代际变化及其与大气环流和北极海冰的联系[J]. 大气科学学报, 2019, 42(1): 68-77.
- [4] 高玉中, 周海龙, 苍蕴琦, 等. 黑龙江省暴雪天气分析和预报技术[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(6): 25-30.
- [5] 蒋大凯, 闵锦忠, 阎琦, 等. 辽宁两类降雪过程的对比分析及定量降雪预报指标[J]. 气象科学, 2012, 32(2): 219-225.
- [6] 唐秀, 李建华, 王金辉, 等. 塔城盆地暴雪预报方法和白灾的防御对策[J]. 沙漠与绿洲气象, 2009, 3(1): 41-44.
- [7] 王清川, 寿绍文, 许敏, 等. 河北省廊坊市初冬雨雪相变特征及预报指标初探[J]. 干旱气象, 2012, 30(2): 276-282.
- [8] 阎访, 王丽荣. 石家庄一次罕见秋季暴雪天气过程物理诊断分析[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(10): 17-24.
- [9] 孙俊, 邓国卫, 夏炳江. 川西高原中部一次极端暴雪成因分析[J]. 气象科技, 2017, 46(3): 584-593.
- [10] 李洪权, 杨咏钢, 尹浩, 等. 不同天气类型下的降雪预报指标分析[J]. 科技通报, 2017, 34(10): 73-79.
- [11] 德勒格日玛, 李一平, 孙永刚, 等. 内蒙古东部初冬一次暴雪天气过程诊断[J]. 干旱区研究, 2015, 32(4): 726-734.
- [12] 万瑜, 曹兴, 窦新英, 等. 中天山北坡一次区域暴雪气候背景分析[J]. 干旱区研究, 2014, 31(5): 891-897.
- [13] 安冬亮, 赵俊荣. 新疆天山中部一次暴雪天气诊断分析[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 470-476.
- [14] 刘惠云, 崔彩霞, 李如琦. 新疆北部一次持续暴雪天气过程分析[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 282-287.
- [15] 赵桂香. 诊断分析技术在山西强降雪预报中的应用[J]. 高原气象, 2014, 33(3): 838-847.
- [16] 王洪丽, 付亚男, 孟雪峰, 等. 呼伦贝尔市 2016 年 3 月 31 日-4 月 2 日暴雪过程天气学特征研究[J]. 冰川冻土,

- 2017, 40(3): 501-510.
- [17] 孙艳辉, 李泽椿, 寿绍文. 东北地区两次历史罕见暴风雪天气过程的分析[J]. 高原气象, 2017, 36(2): 549-561.
- [18] 逯野. 基于 EC 细网格数值预报产品在一次降雪预报中的释用分析[J]. 科技风, 2017(19): 104-105.
- [19] 高铭, 徐玉秀, 蒋姗姗, 等. 2017 年 3 月 7 日锦州地区强降雪天气过程分析[J]. 安徽农学通报, 2017, 24(22): 135-138+145.
- [20] 陈豫英, 陈楠, 翟颖佳, 等. 2015 年深秋宁夏冷涡降雪过程的预报性分析[J]. 干旱气象, 2017, 35(3): 465-474.
- [21] 庄晓翠, 周鸿奎, 李博渊. T639 模式在新疆北部暖区强降雪中的预报检验[J]. 干旱气象, 2015, 33(6): 1031-1037.
- [22] 宋丹, 胡跃文, 刘丽萍. 贵州近 44a 降雪天气形势及物理量诊断分析[J]. 气象科学, 2008, 28(S1): 71-77.
- [23] 许敏, 刘艳杰, 田晓飞, 等. 廊坊市两次强降雪天气的对比分析及数值预报检验[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(S2): 225-229.
- [24] 赵海英, 赵桂香, 李新生, 等. 山西省北中部初冬一次暴雪天气诊断分析[J]. 中国农学通报, 2017, 33(26): 78-82.
- [25] 胡顺起, 曹张弛, 陈滔. 山东省南部一次极端特大暴雪过程诊断分析[J]. 高原气象, 2017, 36(4): 984-992.
- [26] 王子谦, 朱伟军, 段安民. 孟湾风暴影响高原暴雪的个例分析: 基于倾斜涡度发展的研究[J]. 高原气象, 2010, 29(3): 703-711.
- [27] 马林, 马元仓, 王文英, 等. 青藏高原东部牧区秋季雪灾天气的形成及预报[J]. 高原气象, 2001, 20(4): 407-414.
- [28] 梁潇云, 钱正安, 李万元. 青藏高原东部牧区雪灾的环流型及水汽场分析[J]. 高原气象, 2002, 21(4): 359-367.
- [29] 马林, 张青梅, 赵春宁, 等. 青藏高原的东部牧区春季雪灾天气的形成及其预报[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 61-68.
- [30] 马林, 李锡福, 张青梅, 等. 青藏高原东部牧区冬季雪灾天气的形成及其预报[J]. 高原气象, 2001(3): 325-331.
- [31] 董文杰, 韦志刚, 范丽军. 青藏高原东部牧区雪灾的气候特征分析[J]. 高原气象, 2001, 20(4): 402-406.
- [32] 周陆生, 李海红, 汪青春. 青藏高原东部牧区大一暴雪过程及雪灾分布的基本特征[J]. 高原气象, 2000, 19(4): 450-458.
- [33] 邹进上, 曹彩珠. 青藏高原降雪的气候学分析[J]. 大气科学, 1989, 13(4): 400-409.
- [34] 林志强, 假拉, 薛改萍, 等. 1980-2010 年西藏高原大到暴雪的时空分布和环流特征[J]. 高原气象, 2014, 33(4): 900-906.
- [35] 普布卓玛. 西藏高原雪灾中期成因研究[J]. 西藏科技, 2000(3): 58-64.
- [36] 康志明, 罗金秀, 郭文华, 等. 2005 年 10 月西藏高原特大暴雪成因分析[J]. 气象, 2007, 33(8): 60-67.
- [37] 代华光, 李起绪, 黄沛宇. 2014 年 12 月西藏聂拉木暴雪天气分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(15): 180-181+191.
- [38] 罗布坚参, 德吉白珍, 次仁朗杰. 西藏高原西南部地区一次暴雪天气过程诊断分析[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(5): 18-24.
- [39] 周倩, 程一帆, 周甘霖, 等. 2008 年 10 月青藏高原东部一次区域暴雪过程及气候背景分析[J]. 高原气象, 2011, 30(1): 22-29.
- [40] 刘胜胜, 赤曲, 奚凤. 聂拉木三次特大暴雪对比诊断分析[J]. 高原山地气象研究, 2017, 37(3): 46-51.
- [41] 黄晓清, 杨勇, 石磊. 西藏高原不同时段雪灾的空间分布及大气环流特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(2): 396-402.
- [42] 中国气象局国家气象中心. 中国气象地理区划手册[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 28-29.
- [43] 国家发展和改革委员会. 全国及各地区主体功能区规划[M]. 北京: 人民出版社, 2015: 432-555.
- [44] 陈许霞, 季民, 宁方志. 基于 GIS 的格点精细化预报插值方法的研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(10): 69-71+74+78.