

雪灾监测预警指标、方法与实践

■ 肖鹏峰

近年来, 极端天气灾害发生频率增加, 暴雪的影响也越来越大, 造成人民生命财产的巨大损失。监测预警逐渐成为主动防范牧区雪灾和城市雪灾的重要手段。本期文章在介绍牧区雪灾和城市雪灾成灾特点、成害特点的基础上, 探讨雪灾监测预警的手段方法, 介绍雪灾预警模型及实践。



IC photo/ 图

背景

雪灾是我国发生频率较高的自然灾害之一, 严重威胁人民的生命财产和正常生活秩序。根据雪灾的形成条件、分布范围和表现形式, 我国雪灾类型可分为牧区雪灾、风吹雪、雪崩等。其中, 风吹雪、雪崩多发生在高纬度、高海拔区域, 危害有限。而我国牧区面积约 3.63×10^6 平方千米, 饲养牲畜约 1.5 亿头, 牧区雪灾在我国西部频繁发生, 严重影响了畜牧业的发展。此外, 近年来极端天气灾害发生频率增加, 暴雪对城市的影响也越来越大, 我国城市常住人口约占总人口的 63% 以上, 随着城市规模的迅速扩大, 城市雪灾也越来越得到人们的重视。

牧区雪灾发生在依靠天然草场放牧的畜牧业

地区, 是由于冬季积雪过厚、维持时间长, 导致牧草被掩埋, 牲畜无法正常采食或无其他食物来源, 造成牲畜掉膘或者死亡的一种自然灾害。历史上发生过多次牧区雪灾造成大批牲畜死亡的事件, 如 2018 年 12 月 28 日—2019 年 3 月 29 日, 青海省南部牧区出现严重雪灾, 造成约 5.79 万头牲畜死亡, 21 万人受灾。

城市雪灾是指在城区范围内由暴雪所引起的各种灾害事件, 局部持续性暴雪是城市雪灾的主要来源, 严重的城市雪灾会造成交通堵塞、电力和通信线路中断、建筑设施倒塌、人员伤亡和重大经济损失等。近年来, 我国发生过多次城市雪灾, 如 2015 年, 黑龙江省受低温冷冻灾害和雪灾影响, 共造成 5.7 万人受灾, 直接经济损失 8100 余万元; 2018 年 1 月 2 日—5 日, 我国中东部地



区出现大暴雪，强降雪导致部分地区房屋和电力基础设施受损，造成10人死亡，56.7万人受灾，直接经济损失5.1亿元。

近年来，随着各种观测方法和数据处理技术的迅猛发展，监测预警逐渐成为主动防范牧区雪灾和城市雪灾的重要手段，这对提高防灾抗灾能力、减轻雪灾损失、制定防灾备灾措施等具有重要的科学意义和应用价值。

雪灾监测与预警

（一）牧区雪灾监测与预警

牧区雪灾监测是指利用多种观测技术手段，结合社会经济、牲畜等资料，获取影响牧区雪灾发生的环境因素和反映雪灾发生情况及其动态变

化的信息和数据（如积雪、气象、地形、牲畜状况、牧草长势等）；牧区雪灾预警则是通过对监测数据的分析，判定积雪、环境等要素的状态并在雪灾发生前发出警示信息，以便启动相关预案、制定雪灾应急管理、防灾减灾决策，减少雪灾造成的损失。

我国牧区雪灾的发生具有明显的时空特点，发生时期一般从当年的10月开始到次年的4月结束，主要活跃于高海拔、高纬度、天然牧场丰富的地区，集中分布在内蒙古、青藏、西藏等地区。不同牧区雪灾自然条件具有很大差异，牧区雪灾的发生频率也具有较大的空间异质性。如青藏高原牧区约2—3年发生一次雪灾，主要分布在青海南部、那曲、日喀则等地区；内蒙古牧区约1.5年发生一次雪灾，其中阴山地区雪灾最重最频繁；新疆地区因各地气候、地理差异较大，雪灾发生频率差别较大，阿尔泰山区、准噶尔西部山区、北疆沿天山一带和南疆西部山区的牧场，约1.4年发生一次雪灾，其他地区约3年发生一次雪灾。

那么，在对牧区雪灾进行监测预警时，应关注哪些内容和指标呢？早期研究侧重于灾害发生条件的分析，通过监测孕灾环境内降水量的动态变化，综合承灾体的脆弱性的角度分析未来雪灾可能发生的条件；或者通过分析积雪深度、牧草高度对牲畜采食的影响，结合牲畜膘情变化的数学模拟模型和牧区牧草生长模型分析未来雪灾发生的条件。近年来，灾害损失的定量化预测已成为雪灾预警的重要趋势。研究人员通过比较雪灾发生前后的自然条件与牲畜死亡率的关系，对雪灾后的经济损失进行预测；或者将积雪、气象、社会经济等因子作为预警指标体系，利用统计分析、机器学习的方法直接对牲畜死亡率进行预测，以此来获取雪灾等级。总体来说，牧区雪灾作为多因子气象灾害，其危险程度受多种因素影响。然而，现有研究根据不同地域的成灾特点，所选用的预警指标不同，具有较强地域局限性，尚未形成一套准确、普适的预警指标体系，而且现有的牧区雪灾预警模型普遍存在预测过程复杂、可操作性差、易受主客观因素影响，无法实现牧区

表1 牧区雪灾预警指标体系

指标类型	指标名称(单位)
致灾因子	平均气温 (C°)、平均风速 (m/s)、累计降水量 (mm)、年均雪深 (cm)、年均积雪覆盖天数 (天)
孕灾环境	夏季NDVI、人均GDP (万元)、农牧业收入总和 (亿元)、人口密度 (人/km ²)
承灾体	年初牲畜存栏数 (万头)、年末牲畜存栏数 (万头)

雪灾实时动态预警。

因此,针对牧区雪灾监测业务化的需求,基于牧区雪灾预警成因机制和数据的可获取性、可操作性等,我们提出了一种客观的、数据驱动的、操作简便的牧区雪灾预警方法。首先收集导致牧区雪灾发生的孕灾环境因子、致灾因子、承灾因子,建立我国牧区雪灾预警指标体系(见表1);然后采用机器学习方法构建我国牧区雪灾预警模型,基于雪灾历史数据对模型进行训练,根据候选指标的重要性大小,筛选确定雪灾预警的主要指标,得到最优雪灾预警模型;最后输入待预测事件的指标数据,对牧区牲畜死亡率进行预测,并参考国家标准《牧区雪灾等级(GB/T 20482—2006)》,根据牲畜死亡率的大小将预测雪灾等级划分为轻灾(<5%)、中灾(5%—10%)、重灾(10%—20%)、特大灾(>20%)四类,作为减灾、抗灾和紧急救援的决策依据。

(二) 城市雪灾监测与预警

城市雪灾监测主要利用遥感、地理信息系统、数学模拟等多种技术手段,动态监测气象因子、城市环境和发展水平等信息,为城市雪灾预警提供基础的输入数据。其中,气象因素是城市雪灾监测中最重要的一方面,例如降雪量突发性增大时,城市内积雪覆盖面积增大、积雪厚度加深,这将对城市内人员出行、车辆流动等造成严重影响;若积雪遇到极端低温,积雪冻结还会破坏城市供水、供电、供暖系统。较高的社会发展水平可有效抵抗雪灾带来的危害,主要通过防灾减灾设施的建立提升应对灾害的能力。道路、电网和建筑等对于雪灾具有不同的脆弱性,一般性降雪

易造成交通堵塞、民航中断,而电网中断、房屋倒塌往往是特大暴雪造成的结果。因此,需综合考虑气象、社会经济发展和城市设施特点才能对城市雪灾进行有效监测。

城市雪灾监测手段可分为地面监测与遥感监测。在地面监测中,气象观测站可实时监测局部区域的气温、风速和积雪量等致灾因子,而交通路网中各路口的视觉传感器可通过图像处理算法实时监测车流量及过往行人。地面观测站的数据可靠且实时,但只适用于监测小范围重点安全隐患区域。在遥感监测中,光学遥感利用积雪的特殊光谱特性,获取城市内积雪覆盖天数等;微波遥感可监测积雪深度,无人机技术也能够实时动态监测低温的发生强度、积雪冰冻灾害的分布范围及道路交通等因子。由于遥感监测能够获得大范围、长时间序列的海量数据,在地面监测站有限的区域同样可以实现及时、快速监测,具有更高的安全性、可行性和工作效率。

城市雪灾预警是在城市雪灾监测的基础上,描述极端降雪事件的现状和影响并预测其未来,是由传统的天气预警向灾害风险预警的进一步延伸。城市雪灾预警模型相比于牧区雪灾发展相对缓慢,早期主要通过气象因素综合预警法,即利用气温、降雪量等因素,通过主成分分析、灰色关联度分析法等确立指标权重,评定城市雪灾等级,但此方法仅从致灾因子的角度对城市雪灾进行预警。研究人员进一步综合考虑多种因素,将国内生产总值、路网密度等社会经济指标纳入城市雪灾预警体系,通过层次分析法搭建城市雪灾预警模型,由于需要专家打分等手段获取致灾因

表2 城市雪灾预警指标体系

指标类型	指标名称(单位)
致灾因子	温度(C°)、降水量(mm)
孕灾环境	GDP(万元)、积雪覆盖天数(天)
承灾体	人口密度(人/km ²)、路网密度(km/100km ²)、城市面积(km ²)

子的贡献权重,预警结果较为依赖主观经验判断。因此,城市雪灾预警模型的发展目前处于初级阶段,在全国范围内尚无法实现实时预警。

为了实现全国城市雪灾实时预警,我们基于城市雪灾历史记录和多源遥感数据,使用机器学习方法建立了城市雪灾预警模型。该模型综合考虑了致灾因子危险性、孕灾环境敏感性和承灾体脆弱性,基于对城市雪灾的重要性和贡献度,选取贡献度最高的七个特征(见表2),进一步根据雪灾历史记录中的交通堵塞程度、停电停水情况、是否发生房屋倒塌、直接经济损失等,将城市雪灾分为轻度、中度、重度、严重四个等级,将特征和雪灾等级输入机器学习模型,建立预警模型。

雪灾实时监测预警服务

为了使前述理论与方法实际应用于应急管理部国家减灾中心的雪灾预警工作,南京大学积雪遥感研究团队以遥感和地理信息技术为依托,基于机器学习模型研发了“牧区雪灾监测预警系统”和“城市雪灾监测预警系统”,不仅实现了对历史雪灾记录、社会经济数据、遥感监测数据等的处理和建模,而且可以结合气温、降水等天气预报数据,准确、高效地预测雪灾发生等级,并对预测结果进行可视化。

该系统首先应用于2020年冬季全国牧区雪灾预警服务。2020年11月18日至20日,在冷空气频繁影响下,我国新疆北部、青海、内蒙古等地迎来了首场降雪,这是当年入冬以来范围最广、

强度最大的一次雨雪天气过程。研究团队即时启动了牧区雪灾应急服务,将气象站的气温、风速、降水数据、FY-3D雪深/雪水当量日产品以及社会经济统计资料数据接入“牧区雪灾监测预警系统”,自动输出了牧区雪灾预警结果。预报结果表明,该降雪基本不会对牧区产生重大影响,从当月19日至22日雪灾极低风险地区逐渐减少。利用媒体报道和地方上报信息对预警结果进行验证,表明监测结果与灾害情况较为符合。

此后,系统应用于2021年冬季全国城市雪灾预警服务。2022年1月26日至29日大范围雨雪在我国中东部地区强势上线,此次雨雪天气自西向东影响我国长江中下游地区。将实时气温、降水数据、社会经济数据和城市人口、面积等数据接入“城市雪灾监测预警系统”,获得城市雪灾预警结果。结果显示,此次降雪过程主要造成轻度和中度雪灾。据新闻报道,降雪导致陕西、河南、湖北、安徽、江苏等省份大部分地区群众和车辆出行受阻,局部地区房屋、农业和电力基础设施受损,预警结果与媒体报道结果较为一致。

目前,雪灾监测预警系统已初步实现试运行,预警服务成本低廉、结果可靠,具有巨大的应用前景,将对提升雪灾的防灾减灾能力有积极效果,并带来显著的经济社会效益。后续将进一步丰富历史雪灾事件数据,优化模型训练过程,以提高预测精度。同时,还需针对具体的雪灾事件,开展更多的实战应用和精度验证,并在防灾减灾业务应用中不断完善。

(作者系南京大学地理与海洋科学学院教授;本文表1、2由作者提供)