

基于多源数据的三江源区雪灾风险评估

余迪^{1,2} 杜海荣³ 郭娇⁴ 李万志^{1,2} 祁门紫仪^{1,2} 时盛博^{1,2}

(1 青海省气候中心, 西宁 810001; 2 青海省防灾减灾重点实验室, 西宁 810001; 3 青海省气象局, 西宁 810001; 4 青海省玛多县气象局, 玛多 813500)

摘要: 三江源区是青海省雪灾最为严重的地区, 对畜牧业影响较大。利用1961—2020年逐日积雪深度气象资料分析了三江源区冬季雪灾时空分布特征, 运用MOD10A1积雪遥感数据提取积雪覆盖天数, 选择最低气温、雪灾强度及积雪覆盖天数作为致灾因子, 高程和坡向作为孕灾环境, 地均人口、牲畜存栏及土地利用类型作为承灾体, 构建雪灾风险评估模型, 并评估三江源区冬季雪灾风险。结果表明: 三江源区冬季雪灾呈增加趋势, 称多地区最为严重, 进入21世纪后雪灾极端性明显加剧; 称多、玛多等地因最低气温低、雪灾强度大及积雪覆盖天数多导致致灾因子危险性最高, 孕灾环境敏感性自东向西增强, 人口及牲畜存栏均在东部地区较多, 而草地在中、东部地区广泛分布, 因此三江源区以中等承灾体脆弱区为主; 基于所选因子建立三江源区冬季雪灾风险评估模型, 并进行雪灾风险评估, 三江源区中部称多、达日、甘德、同德、泽库及玛沁西部为雪灾风险较高的地区。

关键词: 三江源区, 多源数据, 积雪, 雪灾, 风险评估

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.04.005

Research of Snow Disaster Risk Assessment in the Three-River-Source Area Based on Multi-Source Data

Yu Di^{1,2}, Du Hairong³, Guo Jiao⁴, Li Wanzhi^{1,2}, Qi Menziyi^{1,2}, Shi Shengbo^{1,2}

(1 Qinghai Climate Center, Xining 810001; 2 Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Qinghai Province, Xining 810001; 3 Qinghai Meteorological Bureau, Xining 810001; 4 Maduo Meteorological Bureau of Qinghai Province, Maduo 813500)

Abstract: The Three-River-Source area is featured with the most serious snow disaster in Qinghai Province, which has a great impact on animal husbandry. Using the daily snow depth data from 1961 to 2020, the spatial and temporal distribution characteristics of winter snow disasters in the Three-River-Source area are analyzed. MOD10A1 data are also used to extract snow cover days. The minimum temperature, snow disaster intensity and snow cover days are selected as disaster causing factors, the elevation and slope direction are selected as disaster environmental factors, and the population, livestock and type of land use are selected as disaster bearing factors to build the snow disaster risk assessment model to assess the winter snow disaster risk in the Three-River-Source area. The results show that snow disasters in winter of the Three-River-Source area show an increasing trend, with Chengduo hit most seriously, and with the extremity obviously intensified after entering the 21st century. Chengduo and Maduo are the areas with the lowest winter temperature, the strongest snow disaster intensity and the largest number of snow cover days in the Three-River-Source area, leading to the highest risk of snow disaster causing factors. Moreover, the sensitivity of snow disaster environmental factors increases from east to west. The eastern region is home to relatively large population and livestock, while grassland is widely distributed in the central and eastern regions. So the vulnerability of disaster bearing factors in the Three-River-Source area is mainly medium. Based on the selected factors, the snow disaster risk assessment model is established to assess the winter snow disaster risk in the Three-River-Source area. Chengduo, Dari, Gande, Zeku and the west of Maqin are the areas with high snow disaster risk.

Keywords: the Three-River-Source area, multi-source data, snow cover, snow disaster, risk assessment

0 引言

雪灾是因降雪量级较大, 从而导致大范围积雪、

暴风雪、雪崩等一系列严重影响人畜生存与健康, 或对交通、电力、通信系统等造成不同程度损害的自然灾害^[1-2]。根据雪灾的形成条件、分布范围和表现形式, 雪灾类型可被分为雪崩、风吹雪(风雪流)和牧区雪灾^[3]。其中牧区雪灾是由于积雪过厚、持续时间长, 导致牧草掩埋, 牲畜无法正常采食, 大量畜牧掉膘和死亡的自然灾害, 是对高纬度、高海拔, 特别是

收稿日期: 2022年5月12日; 修回日期: 2023年4月4日
第一作者: 余迪(1992—), Email: yue52400282@163.com
通信作者: 李万志(1984—), Email: 270252918@qq.com
资助信息: 青海省科技厅基础研究项目(2021-ZJ-757)

有着广阔天然草场的牧区影响最为严重的一类雪灾^[4]。随着全球气候变化,三江源区作为世界上海拔最高、面积最广的牧区之一^[5],降雪极端性逐渐加剧,雪灾发生频率随之增加^[6-7]。尤其冬半年频发的雪灾不仅会给畜牧业带来危害,还严重影响甚至破坏交通、通讯等基础设施。因此,开展雪灾风险评估是三江源区雪灾防御工作中必不可少的一项基础性工作,是政府和社会广泛关注的重大现实问题,对科学准确地制定防灾备灾措施、及时组织开展雪灾应急救援工作以及灾后恢复重建决策有着重要的支撑作用。

由于雪灾成灾机制的复杂性及雪灾的突发性和强危害性,对牧区雪灾的研究受到越来越多专家学者的重视,成为自然灾害研究中的热点问题之一。国外学者的研究多聚焦于雪崩的预报预警、动态监测等,而国内学者则主要着眼于雪灾成因和预报、雪灾监测、雪灾风险区划和评估模型研究三个方面^[8-10]。在雪灾风险评估方面,较多的将气象观测资料、遥感卫星数据及社会经济资料融合使用,通过建立评估模型来分析一个地区的雪灾风险。冯学智等^[9]以西藏那曲地区为例,利用气象观测资料和遥感卫星数据,建立了雪灾判别、发展趋势预测和损失评估等模型,较好地草原牧区雪灾进行监测和风险评估。周秉荣等^[11]以青海及周边地区为研究对象,选取气象资料、遥感资料、县域国情资料和雪灾灾情资料进行综合分析,建立了雪灾灾情综合评价预警模型。刘兴元等^[12]取草地、牲畜、积雪等3个方面的9个指标,利用牲畜死亡率对阿勒泰牧区的雪灾风险进行综合评估。张国胜等^[13]针对三江源地区自然风险、生物风险、社会经济风险和管理风险等四个方面,构建三江源地区雪灾评估体系。白媛等^[14]通过构建青海雪灾风险数据库,从致灾因子和承灾体两个角度出发,建立了雪灾风险概念模型和承灾体脆弱性曲线,通过雪灾风险的综合评价得出青海畜牧业雪灾风险南高北低的结论。现有研究侧重于对雪灾致灾因子的分析,对牧区雪灾综合风险的定量研究较少,无法准确反映各地防灾御灾能力的空间性差异,对各地受雪灾影响程度的准确评价和横向把握不够。

雪灾风险评估是雪灾灾害管理和控制的关键环节,对于降低灾害损失、促进社会经济发展、保障人民生活水平具有非常重要的作用。本文采用遥感、气象、社会资料等多源数据,通过分析三江源区冬季雪灾时空分布特征,进一步确定雪灾形成及发展的致灾因子、孕灾环境及承灾体指标,构建雪灾风险评估模型,对三江源区雪灾风险进行区划与评估,为青海省

冬季雪灾防御奠定科学基础。

1 雪灾风险评估内容及方法

1.1 研究区概况

三江源区地处青海南部、青藏高原腹地(图1),属高原大陆性气候,海拔在2585~6779 m,以冰川、冰缘、高山、高地平原、丘陵地貌为主,整体地势西高东低,境内河流密布、湖泊、沼泽众多,雪山冰川广布。三江源区草地类型由东南向西北依次为高寒草甸、温性草原、寒性草原、高寒荒漠,生产力依次降低,草地面积占70%左右^[15]。受高原特殊地理环境及气候条件的影响,冬春季节频发雪灾,对以游牧为主的畜牧业的影响十分严重且持续存在,同时受气候变暖影响,三江源区暖湿化趋势越发明显,雪灾极端性也随之加剧。

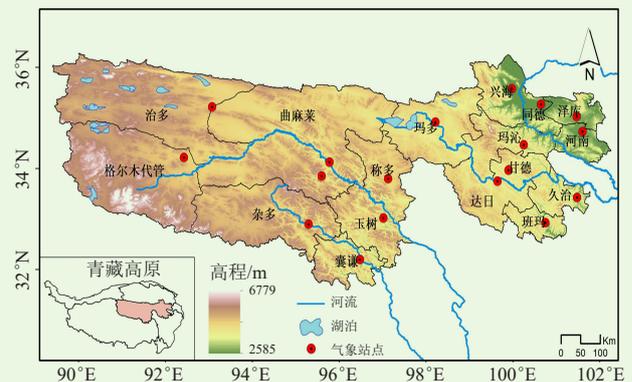


图1 三江源区及气象站点分布

Fig. 1 The Three-River-Source area and the distribution of meteorological stations

1.2 数据来源

气象数据采用三江源区18个国家基本气象站(图1)1961—2020年冬季(11月—次年2月)逐日最低气温、降水量、积雪深度等气象数据。雪灾数据基于《气象灾害分级指标》(DB63/T 372-2018)中雪灾等级划分标准^[16],根据积雪深度及持续时间,将1961—2020年冬季雪灾划分为轻度、中度、重度和特重度四个等级。国土面积、人口数量、牲畜存栏数量等社会统计资料来自青海省统计年鉴。

遥感数据采用MODIS逐日积雪产品MOD10A1/MYD10A1,用以计算2003—2020年积雪覆盖天数。土地利用类型基于Landsat 8遥感影像,通过人工目视解,生成2020年土地利用类型数据,空间分辨率为1 km。地理信息数据采用国家信息中心下发1:25万的境界、水系、居民点及90 m分辨率DEM(数字高程模型)等。

1.3 评估方法

1.3.1 积雪覆盖天数

积雪覆盖天数是在一定时间里，区域内每个像元被积雪覆盖的次数^[17]，计算公式如下：

$$SCD = \sum_{i=0}^N S_i, \quad (1)$$

式中， SCD 表示积雪覆盖天数， N 为一个指定的时间序列范围，在本文中为当年11月一次年2月，即120或121， S_i 表示逐日积雪覆盖数据的二元像素值，即积雪用1表示，非积雪用0表示。

1.3.2 雪灾风险评估方法

对于雪灾风险，不同的行业和学科理解不同，一般包含致灾可能性和风险损失两个方面。目前，针对致灾可能性的研究成果较多，而由于历史灾情资料不够健全，对于风险损失的研究仍多处于定性分析阶段，定量化的评估结论较少^[18]。本文选择基于灾害风险评估原理的多指标综合评估法开展雪灾风险评估研究，该方法综合考虑各指标对总体对象的影响程度，把各个具体指标的作用大小综合起来，计算公式如下：

$$V_j = \sum_{i=1}^n W_i \cdot D_{ij}, \quad (2)$$

式中， V_j 是评价因子的总值； W_i 是指标 i 的权重； D_{ij} 是对因子 j 的指标 i 的归一化值； n 是评价指标个数。

雪灾风险由致灾因子危险性、孕灾环境敏感性及承灾体脆弱性三个因素综合得到^[19]，致灾因子危险性选用最低气温、雪灾强度及积雪覆盖天数，孕灾环境敏感性选用高程及坡向，承灾体脆弱性选用地均人口、地均牲畜存栏及土地利用类型，选用专家打分层次分析法计算各层权重（表1）。采用归一化方法消除各因子间的量纲差异：

$$D_{ij} = 0.5 + 0.5 \times \frac{A_{ij} - Min_i}{Max_i - Min_i}, \quad (3)$$

式中， D_{ij} 是 j 格点第 i 个指标的归一化值； A_{ij} 是 j 格点第 i 个指标值； Min_i 和 Max_i 分别是第 i 个指标值中的最小值和最大值。

致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体脆弱性及雪灾风险分级方法均采用自然断点分级法。自然断点分级法是通过统计方法来确定属性值的自然聚类（聚类结束条件为组间方差最大、组内方差最小），以减少同一级中的差异、增加级间的差异，计算公式如下：

$$SSD_{i-j} = \sum_{k=1}^j (A[k] - mean_{i-j})^2, \quad (1 \leq i \leq j \leq N) \quad (4)$$

式中， SSD 为方差， A 是一个长度为 N 的数组， k 为 A 数

组中的第 k 个元素， $mean_{i-j}$ 为每个等级中的平均值。

表1 雪灾风险评估各层指标权重

Table 1 Index weight of each layer of snow disaster risk

指标类型	权重	基础指标	权重
致灾因子	0.5	最低气温	0.2
		雪灾强度	0.5
		积雪覆盖天数	0.3
孕灾环境	0.2	高程	0.7
		坡向	0.3
承灾体	0.3	地均人口	0.3
		地均牲畜存栏	0.3
		土地利用类型	0.4

2 三江源区雪灾分布特征

1961—2020年三江源区冬季雪灾累计次数年均5.6次，呈增加趋势（0.2次/10 a），轻度、中度、重度和特重度雪灾次数均呈增加趋势，20世纪80和90年代为雪灾频发时段，进入21世纪后雪灾次数相对减少，但特重度雪灾次数较1961—1999年平均值偏多0.5次，可以看出进入21世纪后雪灾次数虽然减少，但特重度雪灾次数增加，极端性明显加剧（图2a、2b）。三江源区各地累计雪灾次数0~54次，中部雪灾次数较多，而东、西部地区雪灾次数较少，其中雪灾多发区主要集中在称多、达日等地，均在20次以上（图2c）。

3 三江源区雪灾风险评估

3.1 雪灾风险评估因子

3.1.1 雪灾致灾因子

三江源区冬季平均最低气温、雪灾强度及积雪覆盖天数总体表现为中部低、强、多，而东部及西部高、弱、少的分布趋势，其中称多、玛多等地为区域内最低气温最低、雪灾强度最强、积雪覆盖天数最多的地区（图3a~3c）。最低气温越低、雪灾强度越强、积雪覆盖天数越多，则雪灾形成的风险越高，致灾因子危险性也就越高。因此针对三江源区冬季雪灾形成的关键条件，选择最低气温、雪灾强度及积雪覆盖天数三个指标作为致灾因子，建立致灾因子危险性模型：致灾因子危险性 = 最低气温 × 0.2 + 雪灾强度 × 0.5 + 积雪覆盖天数 × 0.3。根据该模型计算三江源区冬季雪灾致灾因子危险性指数，利用自然断点法将致灾因子危险性划分为高、中、低三级（划分阈值见表2）。称多为致灾因子高危险区，达日、甘德、玛多、玛沁西部、曲麻莱东部及杂多东部为致灾因子中等危险区，东、西部大部分区域为致灾因子低危险区（图3d）。

3.1.2 雪灾孕灾环境

三江源区高程由东向西增加，唐古拉山等地高

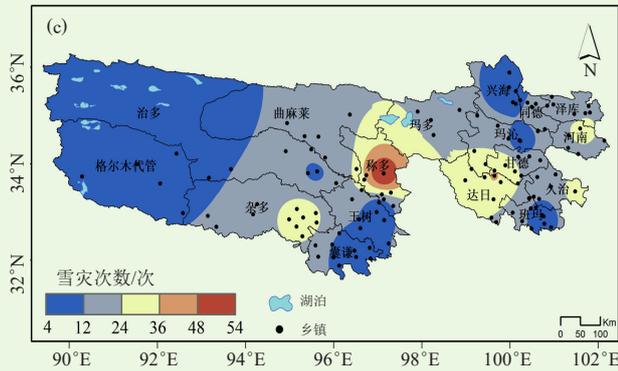
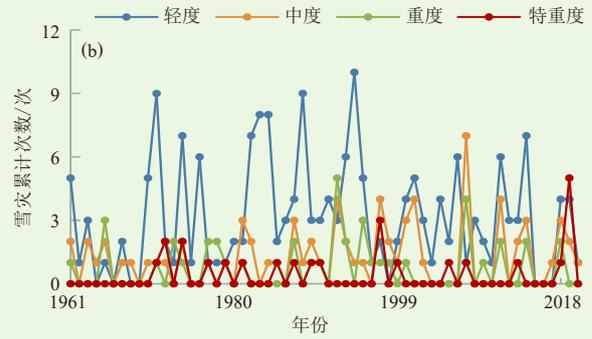
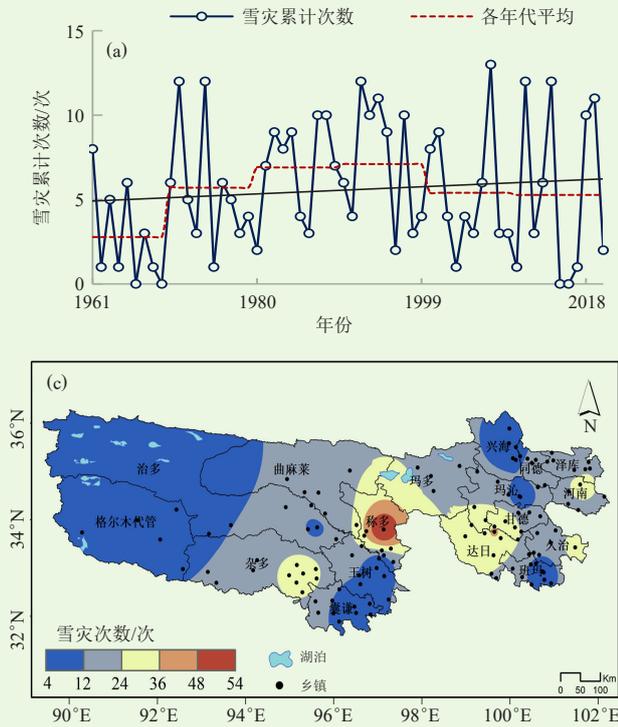


图2 1961—2020年三江源区冬季累计雪灾次数(a)、不同等级累计雪灾次数(b)和年际变化趋势及空间分布(c)
Fig. 2 The interannual variation trend of cumulative snow disaster times (a), cumulative snow disaster times of different grades (b) and the spatial distribution of snow disaster times (c) in winter of the Three-River-Source area from 1961 to 2020

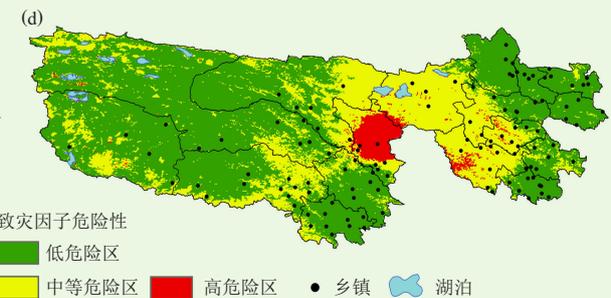
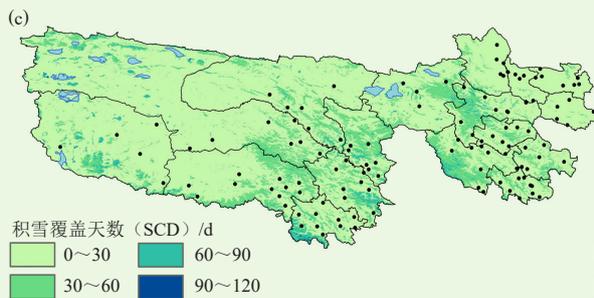
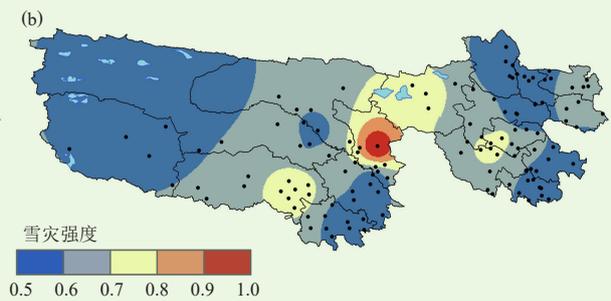
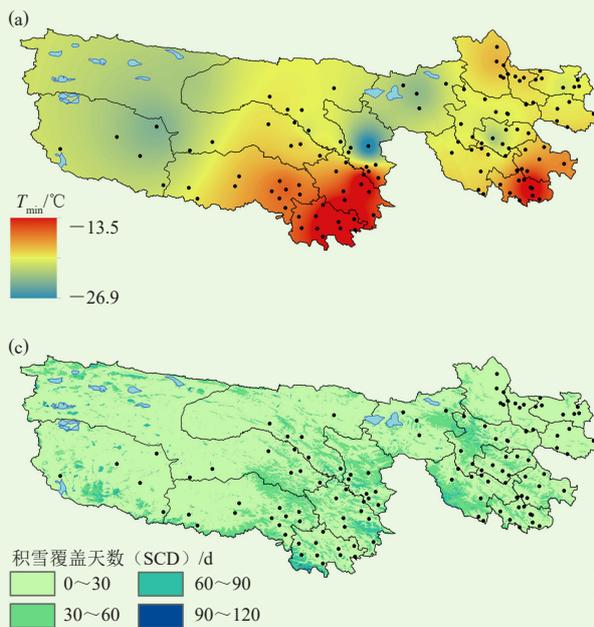


图3 三江源区最低气温(a)、雪灾强度(b)、积雪覆盖天数(c)及雪灾致灾因子危险性(d)空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of minimum temperature (a), snow disaster intensity (b), average days of snow cover (c) and snow disaster causing factors (d) of the Three-River-Source area

表2 致灾因子、孕灾环境、承灾体各等级阈值
Table 2 The threshold value of snow disaster causing factors, environmental factors and bearing factors

等级	低	中	高
致灾因子危险性	0.50~0.68	0.69~0.78	0.79~1.00
孕灾环境敏感性	0.50~0.67	0.68~0.76	0.77~1.00
承灾体脆弱性	0.50~0.60	0.61~0.76	0.77~1.00

程达到6000 m以上, 阳坡与阴坡交错分布, 其中同德、杂多、玛多及唐古拉山地区阴坡占比较高(图4a、4b)。高程高的地方积雪易长时间维持, 而阴坡相比阳坡光照少, 更易孕育雪灾。因此根据雪灾形成环境的变化, 选择高程和坡向作为三江源区雪灾孕灾环境因子, 建立孕灾环境敏感性模型: 孕灾环境敏感性=

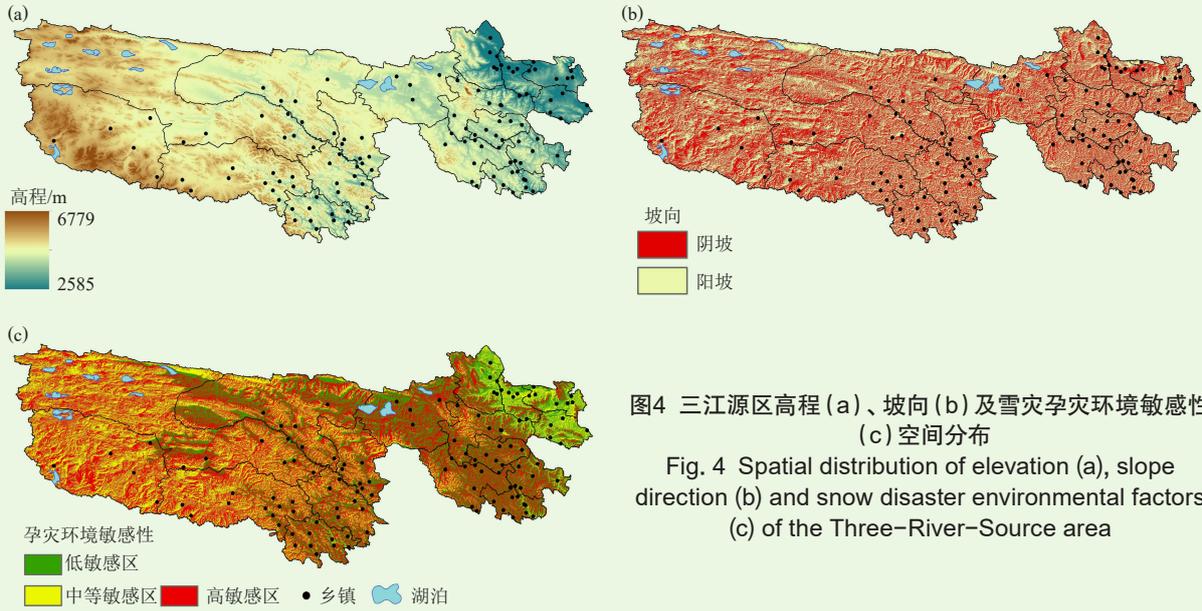


图4 三江源区高程 (a)、坡向 (b) 及雪灾孕灾环境敏感性 (c) 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of elevation (a), slope direction (b) and snow disaster environmental factors (c) of the Three-River-Source area

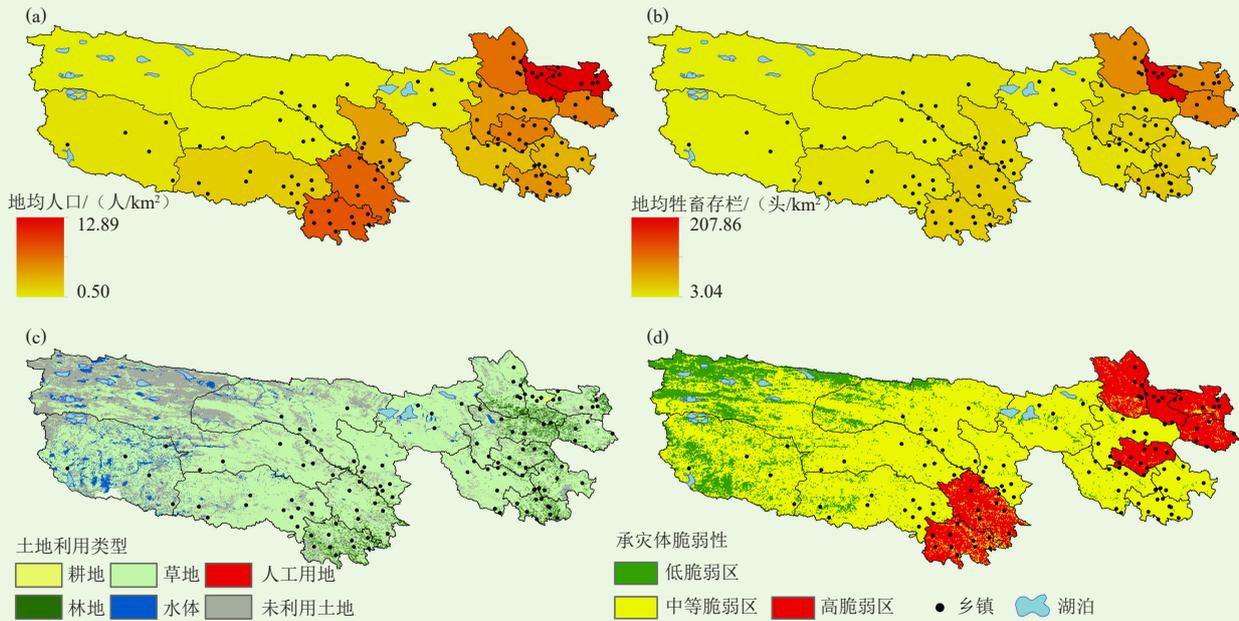


图5 三江源区地均人口 (a)、地均牲畜存栏 (b)、土地利用类型 (c) 及雪灾承灾体脆弱性 (d) 空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of average population (a), average livestock (b), type of land use (c) and snow disaster bearing factors (d) of the Three-River-Source area

表3 不同土地利用类型赋值表

Table 3 Assignment of different land use types

类型	草地	耕地	林地	灌木	沼泽及城市用地	水体及其他
赋值	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5

高程 $\times 0.7$ +坡向 $\times 0.3$ 。根据该模型计算三江源区各地雪灾孕灾环境敏感性指数,利用自然断点法将孕灾环境敏感性划分为高、中、低敏感区三级(划分阈值见表2)。孕灾环境敏感性自东向西逐渐增高,东部为孕灾环境低敏感区,中部地区为孕灾环境低、高敏感区交错区,西部称多、曲麻莱、治多、杂多及唐古拉

山等地为孕灾环境中、高敏感区交错区(图4c)。

3.1.3 雪灾承灾体因子

雪灾在三江源地区影响最为显著的是畜牧业,牲畜存栏及草场面积的多少决定着面临雪灾可能受损的程度,其次对人的影响也不容忽视。三江源区东部及称多、玉树、囊谦等地地均人口较多,东部兴海、同德、泽库及河南等地地均牲畜存栏数较多,草地在东、东部地区分布较广泛(图5a~5c),人口密集、牲畜存栏多、草地分布广的地区,受雪灾影响严重(不同土地利用类型赋值见表3)。因此选择人口密度、地

均牲畜存栏及不同土地利用类型为三江源区冬春季雪灾的承灾体因子，建立承灾体脆弱性模型：承灾体脆弱性=地均人口×0.3+地均牲畜存栏×0.3+土地利用类型×0.4。根据该模型计算三江源区各地雪灾承灾体脆弱性指数，利用自然断点法将承灾体脆弱性划分为高、中、低脆弱区三级（划分阈值见表2）。东部的兴海、同德、泽库、河南、甘德及中部的囊谦、玉树为承灾体高脆弱区，西部小范围区域为承灾体低脆弱区，其余大面积地区均为承灾体中等脆弱区（图5d）。

3.2 雪灾风险空间分布特征

雪灾评估模型的建立要从雪灾成灾链的背景与机理入手，选择致灾因子危险性、孕灾环境敏感性及承灾体脆弱性三个因子，能够较好的反应整个雪灾从形成到持续及危害程度等多方面的风险。据此建立雪灾风险评估模型（各层指标权重见表1），计算各地雪灾风险指数以评估三江源区冬季雪灾风险，雪灾风险评估模型为：雪灾风险指数=致灾因子危险性×0.5+孕灾环境敏感性×0.2+承灾体脆弱性×0.3。

根据三江源区各地雪灾风险指数，利用自然断点分级法，将三江源区冬季雪灾风险划分为高、次高、中等、次低及低风险区五级（划分阈值见表4），得到三江源区冬季雪灾风险分布（图6）。其中，称多为雪灾高风险区，达日、甘德、同德、泽库及玛沁西部为雪灾次高风险区，河南、玛多、玉树西北部、兴海西部、曲麻莱东部、囊谦东部及杂多东部为雪灾中等风险区，其余地区因历年雪灾发生次数少或受雪灾影响的承灾体少等因素均处于次低、低风险区。

表4 雪灾风险各等级阈值

Table 4 The threshold value of snow disaster risks

等级	低	次低	中等	次高	高
阈值	0.50~0.65	0.65~0.70	0.70~0.78	0.78~0.84	0.84~1.00

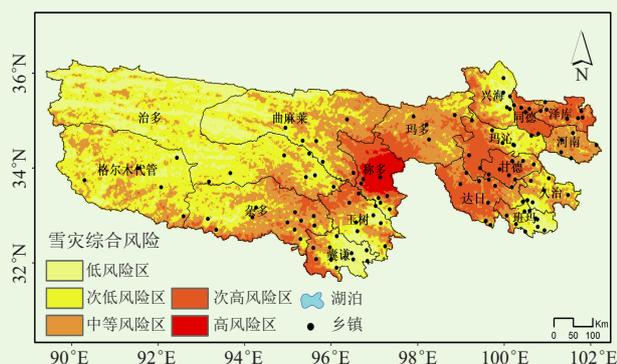


图6 三江源区冬季雪灾风险空间分布

Fig. 6 Spatial distribution characteristics of snow disaster risk in winter of the Three-River-Source area

4 结论与讨论

1) 通过气象资料对近60 a三江源区冬季雪灾累计次数进行分析，雪灾在时间序列上呈增加趋势，但进入21世纪后由于气候变暖等因素，雪灾总次数减少但特重灾次数增加，雪灾的极端性明显加剧，称多、达日及甘德等地雪灾次数最多。

2) 雪灾的形成和发展不是单一因子作用的结果，而是多个不同维度的因子综合得到的，即致灾因子、孕灾环境及承灾体。其中致灾因子是决定一个地区能否发生雪灾的关键因子，孕灾环境则是一个地区是否有形成雪灾的下垫面条件等潜在因素，而承灾体则反映一个地区受灾时可能承受危害的程度。通过对三江源区致灾因子、孕灾环境及承灾体的分析，发现三江源区中部称多、玛多等地为冬季致灾因子危险性最高的地区，其最低气温、雪灾强度及积雪覆盖天数均是最低、最强、最多的。孕灾环境则自东向西增强。三江源区人口及牲畜存栏均在东部地区较多，草地在中、东部地区广泛分布，承灾体脆弱性以中等脆弱区为主。

3) 根据雪灾风险评估模型得到三江源区冬季雪灾风险评估区划结果，称多为雪灾高风险区，达日、甘德、同德、泽库及玛沁西部为雪灾次高风险区，河南、玛多、玉树西北部、兴海西部、曲麻莱东部、囊谦东部及杂多东部为雪灾中等风险区，其余地区因历年雪灾发生次数少或受雪灾影响的承灾体少等因素均处于次低、低风险区。

本研究将遥感数据运用到雪灾风险评估中，通过细化致灾因子危险性、孕灾环境敏感性及承灾体脆弱性因子，明确了雪灾风险评估的基本指标，构建雪灾风险评估模型，得出三江源区冬季雪灾风险区划。但由于雪灾的形成较为复杂，影响其持续发展的气象及下垫面要素众多，本文所得到结果存在一定的不确定性，雪灾风险评估模型的应用更多是在情况简单、结构单一的牧区。后续为达到与实际更吻合、更精确的结果，还需进一步完善雪灾风险评估模型的建立，不断深入细化致灾因子、孕灾环境及承灾体的研究，更为客观全面地衡量不同指标的贡献度和权重值，针对地形地貌的多样性、社会发展的不均衡性等复杂特征进行动态研究，同时要结合牧畜防灾减灾能力，并利用较为详细的雪灾灾情资料和前人研究成果对模型进行检验及订正，不断完善雪灾风险评估结果的科学性。

参考文献

[1] 吴玮, 秦其明, 范一大, 等. 中国雪灾评估研究综述. 灾害学, 2013,

28(4): 152-158.

[2] 昌立伟, 黄海波, 许丽丽, 等. 岳阳市冬季暴雪和一般性降雪条件对比分析. 气象科技进展, 2020, 10(3): 141-146.

[3] 高庆华, 马宗晋, 张业成, 等. 自然灾害评估. 北京: 气象出版社, 2007.

[4] 郝璐, 王静爱, 满苏尔, 等. 中国雪灾时空变化及畜牧业脆弱性分析. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 42-48.

[5] 王玉娟, 刘晓燕, 白爱娟, 等. 1961—2017年三江源地区极端降雪指数变化特征分析. 气象与环境学报, 2018, 34(6): 108-115.

[6] 郭晓宁, 李林, 刘彩红, 等. 青海高原1961—2008年雪灾时空分布特征. 气候变化研究进展, 2010, 6(5): 332-337.

[7] Liu F, Mao X, Zhang Y, et al. Risk analysis of snow disaster in the pastoral areas of the Qinghai-Tibet Plateau. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(3): 411-426.

[8] 马东辉. 东北地区雪灾风险综合评价. 南京: 南京大学, 2017.

[9] 冯学智, 鲁安新, 曾群柱. 中国主要牧区雪灾遥感监测评估模型研究. 遥感学报, 1997, 1(2): 129-134.

[10] Tachiiri K, Shinoda M, Klinkenberg B, et al. Assessing Mongolian snow disaster risk using livestock and satellite data. Journal of Arid

Environments, 2008, 72(12): 2251-2263.

[11] 周秉荣, 申双和, 李凤霞. 青海高原牧区雪灾综合预警评估模型研究. 气象, 2006, 32(9): 106-110.

[12] 刘兴元, 梁天刚, 郭正刚, 等. 北疆牧区雪灾预警与风险评估方法. 应用生态学报, 2008, 19(1): 133-138.

[13] 张国胜, 伏洋, 颜亮东, 等. 三江源地区雪灾风险预警指标体系及风险管理研究. 草业科学, 2009, 26(5): 144-150.

[14] 白媛, 张兴明, 徐品泓. 青海省畜牧业雪灾风险评价研究. 青海师范大学学报(自然科学版), 2011, 27(1): 71-77.

[15] 邵全琴, 刘国波, 李晓东, 等. 三江源区2019年春季雪灾及草地畜牧业雪灾防御能力评估. 草地学报, 2019, 27(5): 1317-1327.

[16] DB63/T 372-2018, 气象灾害等级. 青海: 青海省质量技术监督局, 2018.

[17] 张文博, 肖鹏峰, 冯学智. 基于MODIS数据的我国天山典型区积雪特征研究. 遥感技术与应用, 2012, 27(5): 746-753.

[18] 邹铭, 范大一, 杨思全, 等. 自然灾害风险管理与预警体系. 北京: 科学出版社, 2010.

[19] 陈海山, 孙照渤. 积雪季节变化特征的数值模拟及其敏感性试验. 气象学报, 2004, 62(3): 269-284.

(上接28页)

$Mg^{2+} > F^- > K^+$ 。 Ca^{2+} 是降水中主要的阳离子, 其浓度为 $89.73 \mu eq/L$, SO_4^{2-} 是降水中主要的阴离子, 其浓度为 $38.34 \mu eq/L$ 。

3) 通过中和因子、富集因子、相关性计算, 发现 Ca^{2+} 和 NH_4^+ 对酸性物质具有较强的中和作用。 Na^+ 基本来源于海源, Ca^{2+} 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 基本由陆地源贡献, 海源和陆源对 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 都有一定的贡献。人类活动对瓦里关地区降水中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 的来源有较大贡献。

4) 瓦里关地区降水离子浓度主要受西风源和局地源影响。

参考文献

[1] 康世昌, 丛志远. 青藏高原大气降水和气溶胶化学特征研究进展. 冰川冻土, 2006, 28(3): 371-379.

[2] 王剑, 徐美, 叶霞, 等. 沧州市大气降水化学特征分析. 环境科学与技术, 2014, 37(4): 96-102.

[3] Calvo A I, Olmo F J, Lyamani H, et al. Chemical composition of wet precipitation at the background EMEP station in Vıznar (Granada, Spain) (2002—2006). Atmospheric Research, 2010, 96(2): 408-120.

[4] Li Z X, He Y Q, Pang H X, et al. Chemistry of snow deposited during the summer monsoon and in the winter season at Baishui Glacier No. 1, Yulong Mountain, China. Journal of Glaciology, 2009, 55(190): 221-228.

[5] Li Z X, Feng Q, Liu W, et al. Study on the contribution of cryosphere to runoff in the cold alpine basin: A case study of Hulugou River Basin in the Qilian Mountains. Global and Planetary Change, 2014, 122: 345-361.

[6] Li Z X, Feng Q, Liu W, et al. The stable isotope evolution in Shiyi glacier system during the ablation period in the north of Tibetan Plateau, China. Quaternary International, 2015, 380-381: 262-271.

[7] 王文兴, 许鹏举. 中国大气降水化学研究进展. 化学进展, 2009, 21(Z1): 266-281.

[8] 丁国安, 徐晓斌, 王淑凤, 等. 中国气象局酸雨网基本资料数据集及初步分析. 应用气象学报, 2004, 15(S1): 85-94.

[9] 汤洁, 薛虎圣, 于晓凤, 等. 瓦里关山降水化学特征的初步分析. 环境科学学报, 2000, 20(4): 420-425.

[10] 侯思宇. 我国典型地区大气降水化学特征及来源解析. 南京: 南京信息工程大学, 2021.

[11] 张占峰, 王红磊, 德力格尔, 等. 瓦里关大气降水的化学特征. 大

气科学学报, 2014, 37(4): 502-508.

[12] 杨东贞, 周怀刚, 张忠华. 中国区域空气污染本底站的降水化学特征. 应用气象学报, 2002, 13(4): 430-439.

[13] 曹晏风. 兰州市大气降水水化学时空变化及影响因子研究. 兰州: 西北师范大学, 2021.

[14] 王剑球, 祁栋林, 薛丽梅. 瓦里关全球大气本底站站址环境及部分观测要素变化特征. 环境化学, 2020, 39(8): 2084-2092.

[15] 程巴阳, 周凌晔, 安兴琴. 瓦里关站大气 CO_2 本底浓度及其源汇区域代表性//第34届中国气象学会年会S9大气成分与天气、气候变化及环境影响论文集. 郑州: 中国气象学会, 2017.

[16] 王廷祥. 大气冷凝水化学特性研究. 上海: 复旦大学, 2012.

[17] 汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 等. 长江源区大气降水化学特征及离子来源. 环境科学, 2019, 40(10): 4431-4439.

[18] 李宗杰, 宋玲玲, 田青. 河西走廊东段大气降水特征及水汽来源分析. 环境化学, 2016, 35(4): 721-731.

[19] 程新金, 黄美元. 降水化学特性的一种分类分析方法. 气候与环境研究, 1998, 3(1): 83-89.

[20] Zhang X Y, Jiang H, Zhang Q X, et al. Chemical characteristics of rainwater in northeast China, a case study of Dalian. Atmospheric Research, 2012, 116: 151-160.

[21] 王艳, 葛福玲, 刘晓环, 等. 泰山降水化学及大气传输的研究. 环境科学学报, 2006, 26(7): 1187-1194.

[22] 黄德银. 广州大气降水中几类典型污染物的化学组成, 沉降能量及物质来源分析. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2007.

[23] 王剑, 侯启婧, 郭蕊, 等. 沧州市降水化学组成及其对大气颗粒物的清除作用. 沧州师范学院学报, 2022, 38(1): 19-24.

[24] 孙亚敏, 王欢. 安徽省近5年大气降水化学组分特征分析. 环境科学与技术, 2021, 44(S2): 89-92.

[25] 张丽明, 胡晓艳. 上海市中心城区大气降水化学组分变化趋势及来源研究. 环保科技, 2020, 26(6): 28-34.

[26] 侯思宇, 邱晨晨, 丁铖, 等. 西安市降水化学组成及来源解析. 环境化学, 2020, 39(9): 2384-2394.

[27] 钟玉婷, 范子昂, 刘新春, 等. 克拉玛依大气降水化学组分及来源分析. 干旱区地理, 2019, 42(5): 1038-1047.

[28] 成彩霞, 赵维俊, 王荣新, 等. 祁连山排露流域青海云杉林对降水化学特征的影响. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(11): 127-131, 145.

[29] 牛晓文, 李新令, 黄震, 等. 华东区域背景地区降水化学特征及成因分析//第34届中国气象学会年会S9大气成分与天气、气候变化及环境影响论文集. 郑州: 中国气象学会, 2017.

[30] Possanzini M, Buttini P, Palo V D. Characterization of a rural area in terms of dry and wet deposition. Science of The Total Environment, 1988, 74: 111-120.

[31] 张泽锋, 沈利娟, 朱彬, 等. 南京市降水化学特征及其来源研究. 大气科学学报, 2015, 38(4): 473-482.