

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0089

LU Xinyu, CHEN Rensheng, LIU Yan, et al. Spatiotemporal variation of rain-on-snow days in northern Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(5): 1446–1457. [卢新玉, 陈仁升, 刘艳, 等. 我国新疆北部地区雪面雨日数时空变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5): 1446–1457.]

# 我国新疆北部地区雪面雨日数时空变化特征分析

卢新玉<sup>1</sup>, 陈仁升<sup>2</sup>, 刘艳<sup>1</sup>, 王秀琴<sup>3</sup>, 宋志国<sup>4</sup>

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆乌鲁木齐 830002; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃兰州 730000;  
3. 新疆维吾尔自治区气象信息中心, 新疆乌鲁木齐 830002; 4. 山东省沂水县气象局, 山东沂水 276400)

**摘要:** 在全球变化背景下, 雪面雨发生频次增加, 致灾风险加大, 认识雪面雨时空变化特征对于防洪减灾具有重要意义。基于我国新疆北部地区42个国家气象站1960—2015年逐日气温、降水、雪深、天气现象等气象观测数据, 制定降水类型、地面状态、雪深等共同判定雪面雨事件的参数化方案, 进而分析新疆北部地区雪面雨日数时空变化特征及其与气温、海拔的关系。结果表明: 近56 a来新疆北部地区雪面雨日数以 $0.3 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的速率呈缓慢增加趋势; 空间分布上, 新疆北部地区雪面雨主要集中于塔城北部、伊犁河谷、乌鲁木齐河源地区, 其中塔城裕民县最多, 年平均雪面雨日数12.2 d; 相关分析显示雪面雨日数及雪面雨量均与海拔呈显著正相关。该研究有望提升对新疆干旱区雪面雨事件这一诱发雨雪混合洪水重要现象的科学认识, 为新疆地区致灾洪水过程分析以及洪水监测预警提供参考。

**关键词:** 雪面雨; 降雨; 积雪; 时空变化; 新疆北部

**中图分类号:** P468.0\*25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)05-1446-12

## 0 引言

雪面雨(rain-on-snow, ROS), 即雪面降雨, 是一种降雨与积雪相结合的多变量水文气象现象<sup>[1]</sup>, 其在积雪表面和积雪内部发生着复杂的热量、能量交换。由于降雨与融雪的复合效应, 尤其是在气候变化背景下, 雪面雨事件具有引发多种自然灾害的高潜力, 如洪水<sup>[2-4]</sup>、雪崩<sup>[5-6]</sup>、泥石流<sup>[7-8]</sup>等。融雪和降雨的综合效应可导致比仅由融雪或降雨所引发的更为严重的洪水<sup>[9]</sup>。此外, 雪面雨导致雨水冻结在雪堆或土壤表面形成冰冻层, 影响动物活动和觅食能力, 在极端情况下可导致其因饥饿死亡, 对野生动物生活环境造成影响<sup>[10-11]</sup>。这些ROS事件对相关行业均产生重大影响, 特别是水资源管理、洪水预测和风险管理<sup>[3, 12-15]</sup>等。因此, 近几十年来受到广泛关注<sup>[16-20]</sup>。

针对雪面雨事件国外学者已经开展了大量研

究。这些研究涉及雪面雨频次及强度变化<sup>[19, 21]</sup>、雪面雨加速积雪消融过程及其致灾机理<sup>[22]</sup>、雪面雨洪水变化及未来预估<sup>[23]</sup>等。研究指出, 气候变暖带来的一个重要后果是雪面雨事件的增加<sup>[1, 18]</sup>。ROS事件有复杂的生成机制, 依赖于雪深、降水类型(雨或雪)和气温的综合变化<sup>[3, 15]</sup>。在过去50年里, 雪面雨事件在以雪为主的流域变得更加频繁, 因为全球平均气温的上升导致了更多的冬季降水以雨而非雪的形式下降<sup>[24-27]</sup>。随着气候变化导致的气温上升, ROS的频率在高海拔地区<sup>[28]</sup>以及高纬度地区<sup>[29]</sup>呈增加趋势。然而, 国内对ROS的研究尚不多见<sup>[30]</sup>, 陈仁升等<sup>[30]</sup>系统介绍了雪面雨概念、影响及其研究进展。国内在气象、水文预报中关注到雨雪混合洪水<sup>[31-33]</sup>, 主要在洪水预报的影响因子分析中涉及到雨雪混合现象。然而针对气候变暖对我国高纬度、高海拔地区雪面雨事件发生频率的影响、我国雪面雨事件发生特点及其致灾机理等的系统研究尚未

收稿日期: 2021-07-03; 修订日期: 2021-09-20

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2020D01A137); 国家重点研发计划项目“干旱区融雪洪水灾害监测预报和防控关键技术研究” (2019YFC1510500); 天山青年计划(2019Q039)资助

作者简介: 卢新玉, 副研究员, 主要从事积雪水文研究. E-mail: luxy@idm.cn

通信作者: 陈仁升, 研究员, 主要从事寒区水文观测与模拟研究. E-mail: crs2008@lzb.ac.cn

开展。

新疆地区冰川、积雪广泛分布,在其融水补给河川径流的同时,也常伴有冰川洪水、融雪洪水、泥石流、雪崩和风吹雪等冰雪灾害发生<sup>[34-37]</sup>。随着气候变暖,新疆洪水灾害尤其是雪、冰融水洪水的频次增加,每年都会给公路交通、下游水库、渠道等工程设施以及人民生命财产安全等造成损失<sup>[34]</sup>。雨雪混合洪水主要是在积雪消融季节由中低山区降雨径流叠加高山区的积雪融水而形成的,但近年来由于雪面雨造成的雨雪混合洪水越来越多,过去一直没有得到重视<sup>[30]</sup>。开展新疆北部地区雪面雨时空变化特征研究,将为科学认识 ROS 事件在新疆干旱区发展变化提供重要参考,同时对新疆地区致灾洪水过程分析以及洪水预报具有重要意义。

## 1 资料与方法

本文所用新疆北部地区 42 个国家级台站资料来源于新疆气象信息中心。应气象观测业务自动化发展需要,2015 年至今,气象台站天气现象观测均采用天气现象仪自动观测,因观测方法与观测设备存在差异,为保证分析数据的一致性,本文选取数据起止时间为 1960—2015 年。新疆北部 52 个国家站中,从 1960 年有记录的有 44 站,再剔除缺测记录较多的 2 站,最终选取记录较为完整的 42 个台站逐日气温、降水、雪深、天气现象等观测数据作为研究对象,站点分布见图 1。分析要素选取天气现象包含的 33 种降水类型、地面状态(表 1)以及降水起止时间等。由于新疆北部大部分地区积雪出现在每年的冷季(10 月—次年 4 月),因此选取冷季的气象观测记录进行雪面雨日数统计分析。

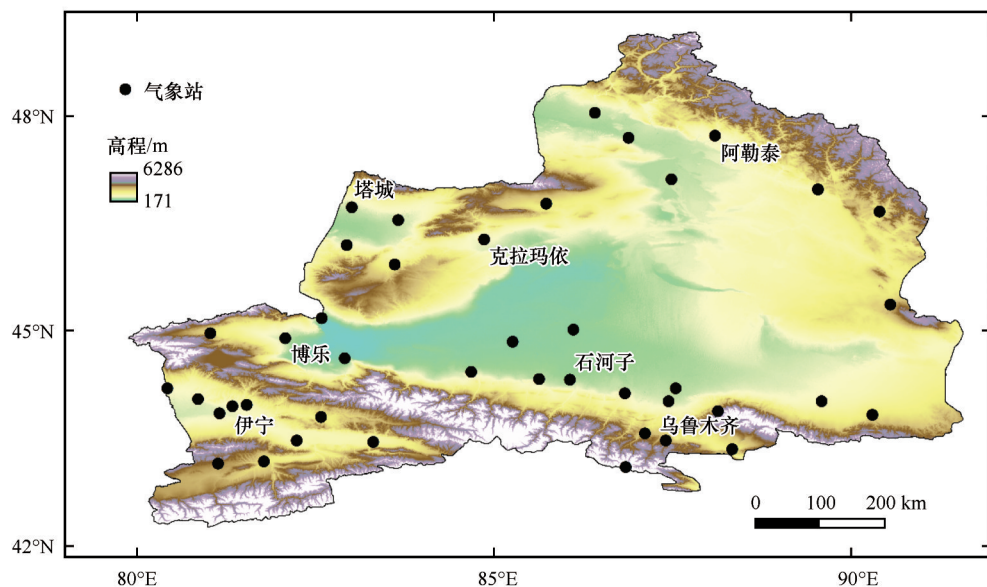


图 1 新疆北部站点分布

Fig. 1 Distribution of the meteorological stations in northern Xinjiang

### 1.1 “雪面雨日”定义及判定

根据雪面雨定义,本文统计台站当日天气现象出现降雨天气类型中的任意一种(见表 1),且地面状态为积雪或雪深记录大于 0 cm,为一个雪面雨日,即满足 ROS 事件的所有水文气象条件(降雨、积雪、雪深)的一天为一个雪面雨日。

由“雪面雨日”定义,基于气象台站实况观测资料(降水类型、地面状态、雪深),制定天气现象与雪深记录共同判定雪面雨事件的参数化方案。具体方法为,首先由逐日天气现象观测数据提取降水类

型与地面状态编码,其次判断降雨现象与积雪状态是否同时存在,若地面状态数据缺测则增加雪深记录判识,由此确定该日是否为雪面雨日。

### 1.2 趋势分析

为揭示台站雪面雨日数的具体变化,选取雪面雨发生次数较多的塔城、伊犁河谷 12 个台站以及所有台站作为整体进行冷季逐月时间趋势分析。趋势分析以时间线性回归的斜率计算,并以时间序列均值的百分比表示,以此比较一个台站和其他台站在时间变化上的不同特征。趋势的统计学意义采

表1 降水类型及地面状态天气现象编码

Table 1 Weather codes for precipitation type and ground state

	天气现象	
	编码	天气现象
降水类型	降雨	
	50~59	毛毛雨(强度随编码增大而增加,下同)
	60~67	雨
	80~82	阵雨
	降雪	
	70~75	雪
	76~79	冰针、米雪、冰粒
地面状态	85~86	阵雪
	积雪	
	16	地面有积雪覆盖

用非参数 Mann-Kendall 检验<sup>[38]</sup>进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 雪面雨时空变化

#### 2.1.1 总体变化

##### (1) 时间变化

通过逐站点计算 1960—2015 年新疆北部地区冷季(10月—次年4月)气温、降雨(雪)日数、雪面雨日数、降雨量、雪面雨量,同时,引入次均降雨量的概念以体现降雨量的年平均变化,即通过历年降雨总量和降雨次数计算得到次均降雨量,同理,获得次均雪面雨量,最后以全部站点平均值估算新疆北部地区各要素的年际变化情况(图2)。结果显示,新疆北部地区雪面雨日数表现出微弱增加趋势[图2(a)],气温则以  $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$  的速率呈显著上升趋势[图2(b)]。大量研究证实,气温上升使得降水相态更多由降雪转为降雨<sup>[16]</sup>,从而导致降雪日数减少,降雨日数增加,对新疆北部地区降雨、降雪日数的趋势分析也证明了这一点[图2(c)、2(d)]。由于雪面雨现象发生的先决条件是降雨存在,因此两者有着密切联系,图2(c)显示降雨日数表现出与雪面雨日数一致的微弱增加趋势。图2(e)和2(f)给出降水量趋势变化,与相对应频次的微弱上升趋势不同,雨量上两者均表现为明显的增加,这说明随着气温升高,降雨在整个降水量比例中所占比例随之升高。进一步地,通过计算得到次均降雨量与次均雪面雨量如图2(g)、图2(h)所示。次均降雨量呈现出稳定上升的趋势,由最初的不足  $2\text{ mm}\cdot\text{次}^{-1}$  上升到平均  $3\text{ mm}\cdot\text{次}^{-1}$ ,而次均雪面雨量则在 1980 年前后出现明显增加,前 20 年平均在  $2\text{ mm}$  以下且呈逐

年减少趋势,而后 35 年增加 3 倍达到  $6\text{ mm}\cdot\text{次}^{-1}$ 。由此看出,虽然频次变化不大,但每次雪面雨发生时的降雨量在近几十年有了显著增加,由于雪面雨现象的特殊性,也使其诱发洪水的风险大大增加。

##### (2) 空间分布及变化

新疆北部历年雪面雨日数出现较多区域位于塔城北部、伊犁河谷以及乌鲁木齐河源地区[图3(a)],其中塔城北部的塔城市与裕民县年均雪面雨日数均在 10 d 以上,其余两站分别为 9.8 d 与 5.5 d,伊犁河谷虽没有 10 d 以上台站,但分布面积较广,大部分台站年均雪面雨日数在 5~10 d(占 70%),而乌鲁木齐河源地区则是由于海拔高,台站几乎全年都有积雪,如天山大西沟站海拔达到 3 500 m 以上,年平均气温  $-10.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,积雪日数平均为  $193\text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$ ,远高于其他台站,因而其雪面雨日数也较多。

通过分析降雨日数分布[图3(c)],也反映出上述 3 个区域为冷季降雨多发区,而年均降雪日数分布表现出与降雨日数的反位相特征[图3(b)]。气温分布图显示[图3(d)],伊犁河谷一带冷季平均气温在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上,塔城地区和乌鲁木齐河源一带则在  $-4\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,表明雪面雨易发生于气温较高地区。雪面雨量与降雨量的分布表现出高度一致性,大值区都分布在塔城、伊犁河谷、以及乌鲁木齐河源地区[图3(e)、3(f)]。

图4通过计算每个台站 1960—2015 年的时间线性回归斜率,并以时间序列均值的百分比表示,给出新疆北部地区雪面雨日数、气温、降雪日数以及降雨日数的空间变化趋势。图4(a)显示,雪面雨日数增加最为显著的为乌鲁木齐河源和伊犁河谷地区,而出现频次较多的塔城北部则大部分呈减少趋势;气温空间变化显示[图4(b)],42 个台站绝大部分均为上升趋势,仅有一个台站为下降趋势;降雪日数与降雨日数的空间变化则反映出气温升高带来的降雪减少、降雨增加的整体变化趋势。

#### 2.1.2 不同积雪期 ROS 年际变化

由于在积雪累积和消融阶段积雪深度以及降水相态均存在不同变化,为揭示不同积雪期 ROS 的变化特征,根据新疆北部地区积雪的季节变化规律以及相关文献对积雪期划分<sup>[37]</sup>,将新疆北部地区积雪期分为积累期(10—12月)、稳定期(1—2月)和消融期(3—4月)三个阶段。分别统计 1960—2015 年 3 个不同积雪期雪面雨日数、雪面雨量、平均雪深、降雨量的年际变化特征,如图5所示。图5(a)显示



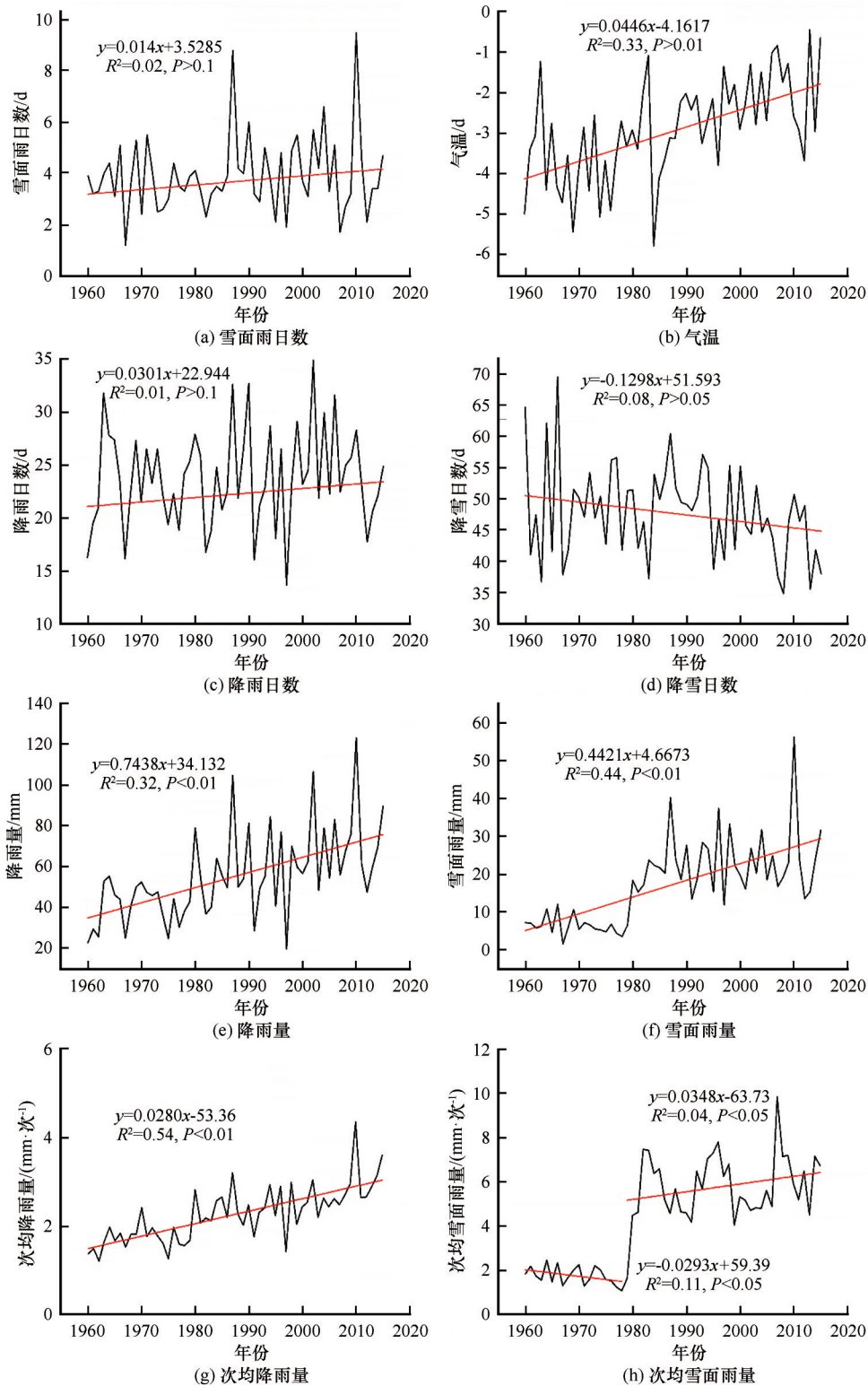


图2 1960—2015年新疆北部地区平均雪面雨日数(a)、气温(b)、降雨日数(c)、降雪日数(d)、降雨量(e)、雪面雨量(f)、次均降雨量(g)以及次均雪面雨量(h)的变化趋势

Fig. 2 Variations of annual ROS days (a), temperature (b), rainfall days (c), snowfall days (d), rainfall (e), ROS amount (f), mean rainfall (g) and mean ROS amount (h) in northern Xinjiang from 1960 to 2015

雪面雨日数在积雪稳定期明显少于积累期与消融期,平均小于1 d,这主要由于积雪稳定期降水类型主要为降雪,而积累期与消融期为季节转换期,频

繁发生雨雪转换,由于气温升高导致降雨起始日提前、结束日推后,因此导致雪面雨增多现象。雪面雨量的变化特征与雪面雨日数一致,值得一提的

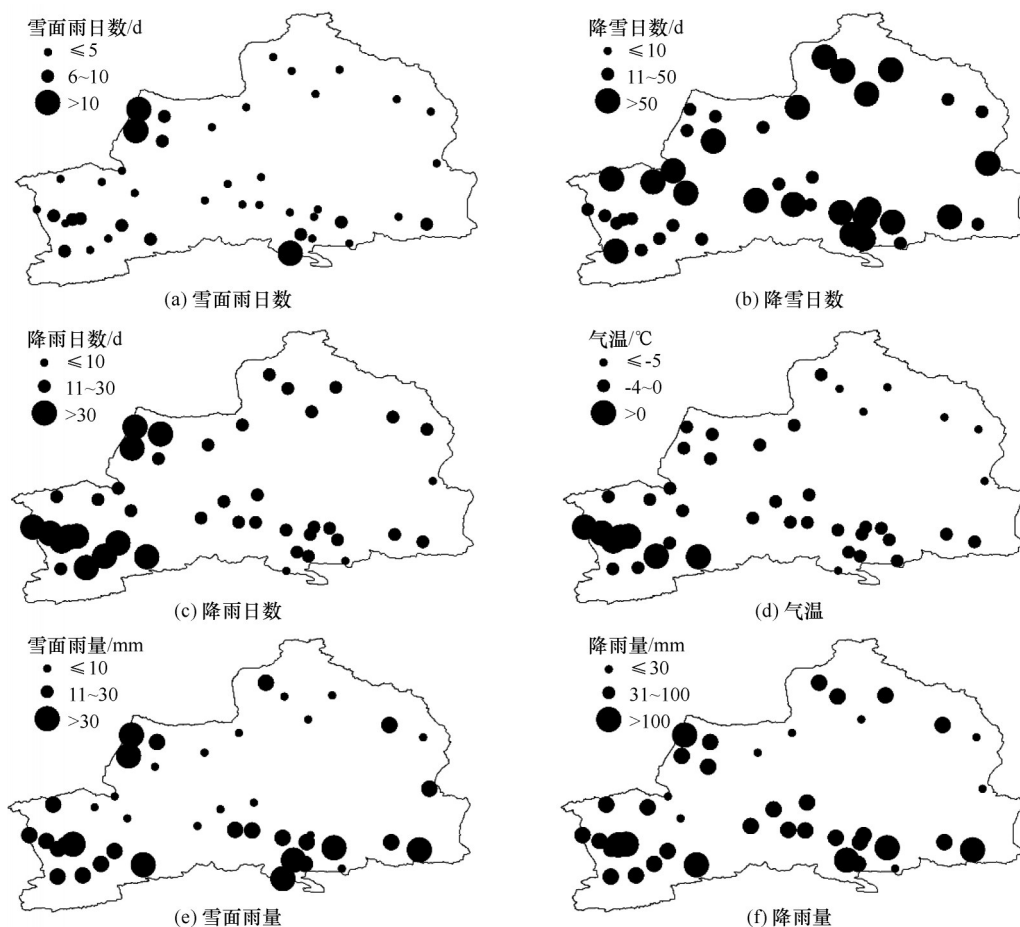


图3 1960—2015年新疆北部地区历年平均雪面雨日数(a)、降雪日数(b)、降雨日数(c)、气温(d)、雪面雨量(e)、降雪量(f)空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of the annual ROS days (a), snowfall days (b), rainfall days (c), temperature (d), ROS amount (e) and snowfall (f) in northern Xinjiang from 1960 to 2015

是,自1980年以来,雪面雨量在积雪积累与消融期均呈现出显著增加的趋势,而在积雪稳定期雪面雨量也从之前几乎没有到逐步增加[图5(b)]。图5(c)反映出平均雪深在积雪稳定期明显高于积累期与消融期、而积累期与消融期变化趋势相对平稳的特征。降雨量则体现了与雪面雨量相似的变化特征,而量级增大一倍,特别地,降雨量在积雪积累期与消融期均显示出不断升高的变化趋势[图5(d)]。

### 2.1.3 单站ROS各月变化

选取伊犁河谷与塔城北部雪面雨出现较多区域的12个台站以及所有台站作为整体,分析其1960—2015年冷季各月在雪面雨日数、气温、降雨日数以及降雪日数的变化趋势。趋势是计算从1960年到2015年冷季逐月,以及所有研究区域整个冷季的变化。雪面雨日数[图6(a)]显示12个站以及所有台站整体在入冬的10月均为减少趋势,之后有所增

加,到3月再次下降,4月基本持平,从最后一列整个冷季(W)总趋势来看,大部分台站以及整体都呈增加趋势,仅有3个站为减少趋势。图6(b)各站的气温变化则显示普遍呈上升趋势,上升最缓慢为10月,而2月上升速度最快。与雪面雨日数相似,降雨日数也表现出减少-增加-减少的变化趋势,整体同样为增加趋势[图6(c)]。降雪日数除12月与2月有部分台站略有增加外,其他均为减少趋势,整个冷季都呈减少趋势[图6(d)]。以上分析也与之前分析整体一致,即全球变暖背景下,气温整体上升,而降雪减少、降雨增加,雪面雨则表现出有升有降,整体略有上升的变化趋势。

## 2.2 雪面雨变化的影响因素分析

### 2.2.1 气温对ROS的影响

图7(a)~7(d)分别给出雪面雨日数、雪面雨量、降雨日数以及降雪日数与气温的散点图。与时间变化趋势一致(图2),随着气温升高,雪面雨日数呈

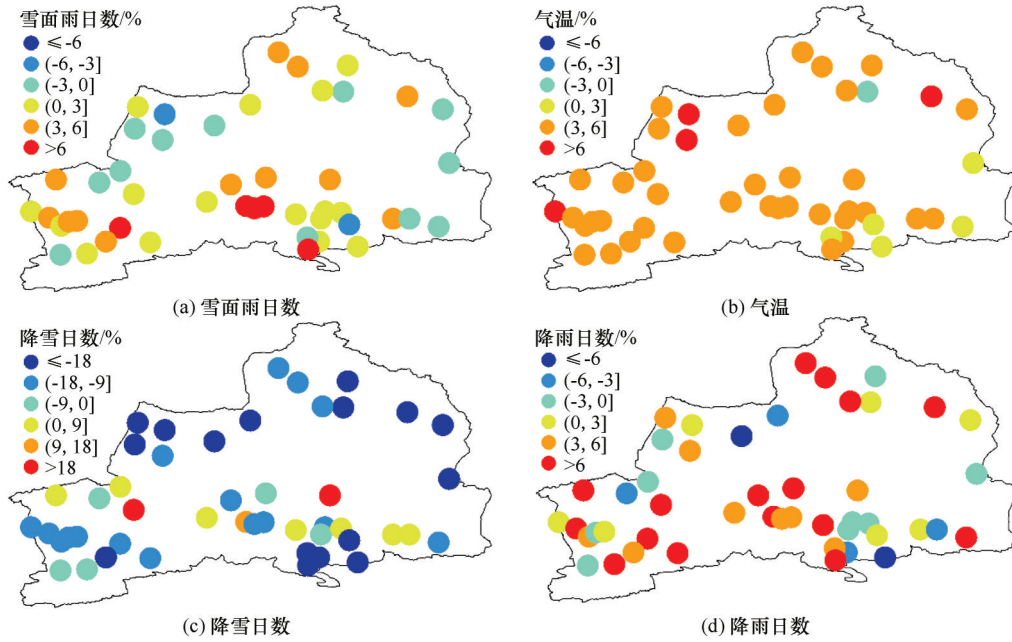


图4 1960—2015年新疆北部地区各台站雪面雨日数(a)、气温(b)、降雪日数(c)和降雨日数(d)的年变化趋势  
Fig. 4 Variation of annual ROS days (a), temperature (b), snowfall days (c), and rainfall days (d) for each station in northern Xinjiang from 1960 to 2015

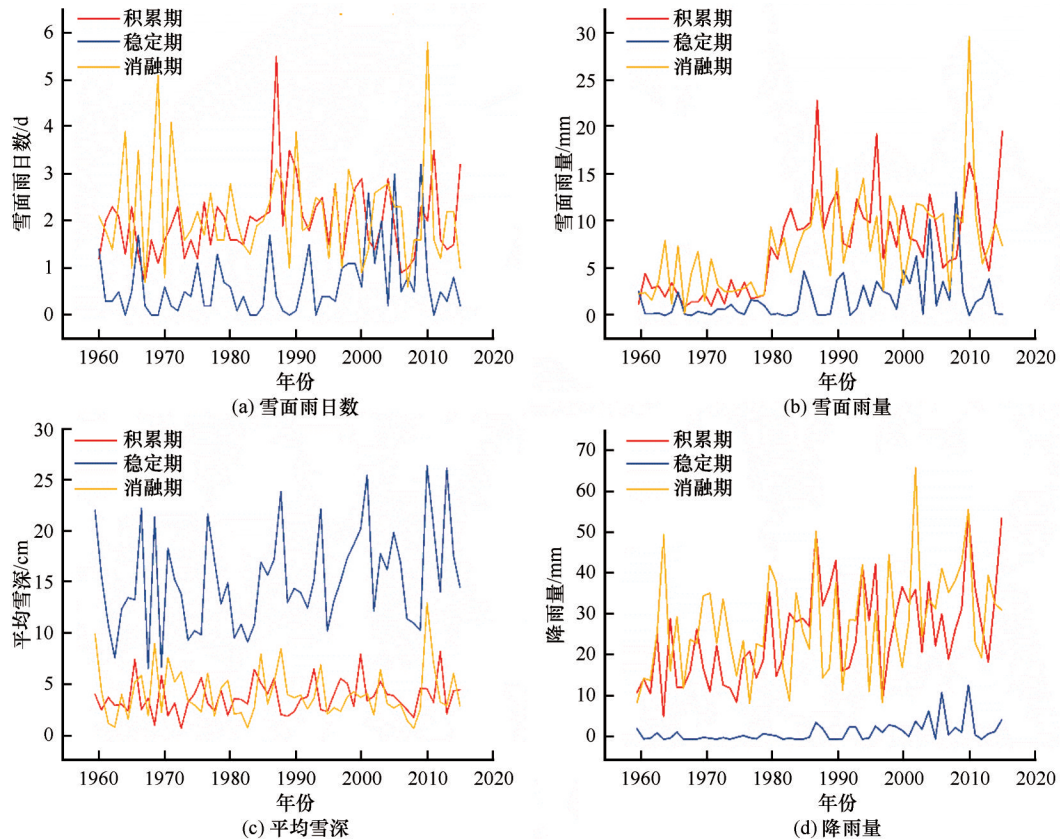


图5 不同积雪期雪面雨日数(a)、雪面雨量(b)、平均雪深(c)、降雨量(d)的年际变化特征  
Fig. 5 Variations of annual ROS days (a), ROS amount (b), mean snow depth (c), and rainfall (d) in different snow cover periods

微弱增加趋势,但变化趋势并不显著,相关系数仅为0.04,未通过显著性检验。与其相比,雪面雨量

则呈现出较为显著的增加趋势,通过0.01的显著性检验。这一结果也与年际变化趋势分析一致,即气



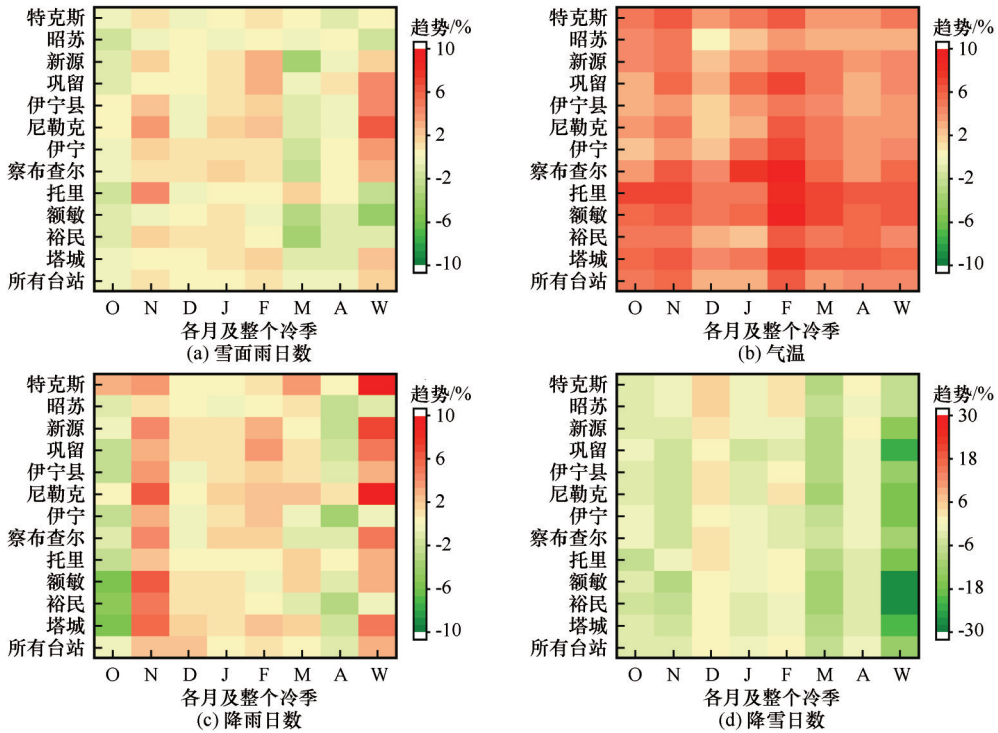


图6 塔城北部、伊犁河谷 12 台站以及全台站雪面雨日数、气温、降雨日数、降雪日数各月变化趋势 (O~W 分别代表 10 月至次年 4 月以及整个冷季)

Fig. 6 Variation of monthly ROS days (a), temperature (b), rainfall days (c) and snowfall days (d) at 12 stations in northern Tacheng and Ili River Valley and total stations (O to W represent October to next April and the whole cold season respectively)

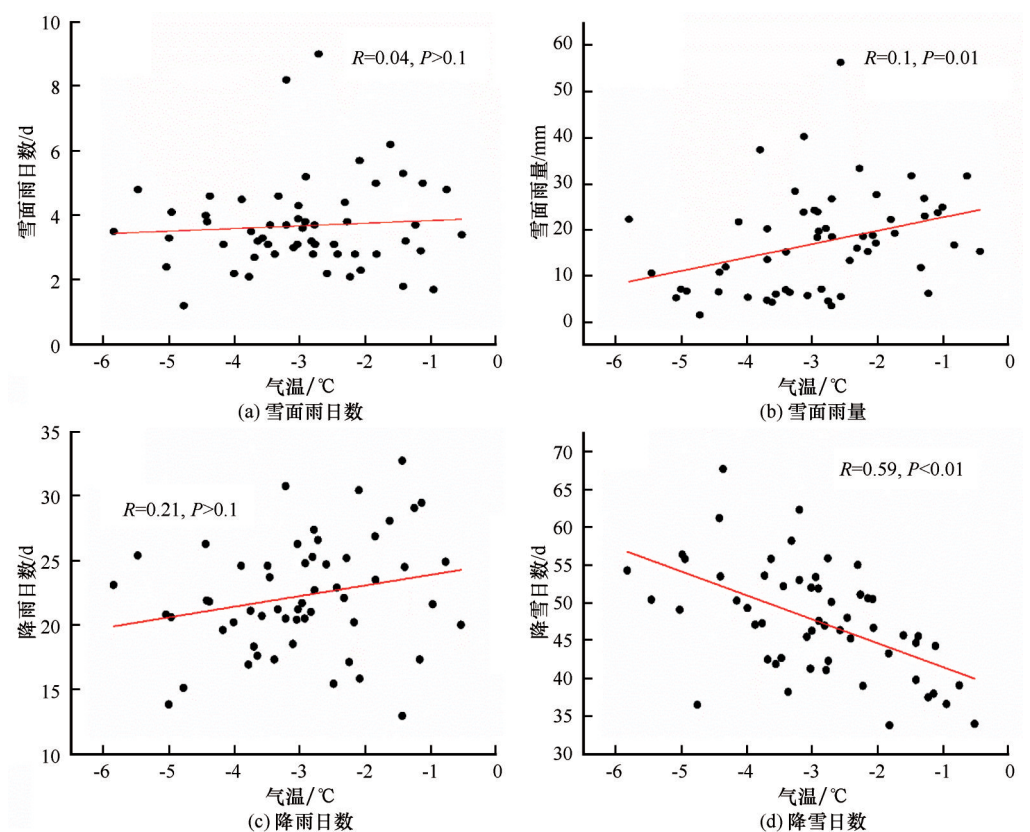


图7 1960—2015 年新疆北部地区 42 台站雪面雨日数、雪面雨量、降雨日数以及降雪日数与气温的散点图  
Fig. 7 ROS days (a), ROS amount (b), rainfall days (c) and snowfall days (d) versus air temperature at the 42 stations over northern Xinjiang from 1960 to 2015

温升高导致雪面雨以及降雨在雨量上均比频次上有着显著的增加趋势[图2(e)~2(f)]。图7(c)与图7(d)显示降雨日数随气温升高缓慢增加,而降雪日数明显减少,相关系数达到0.59并通过0.01的显著性检验。

为了揭示降雨、降雪日数以及雪面雨日数与气温的关系,逐站计算1960—2015年各要素相关关系如图8所示。42个气象站的降雪日数均与气温呈负相关,其中有28个站达到99%以上显著性水平,4个站达到95%以上显著性水平,有9个沿天山北坡一带观测站不具有统计学意义[图8(a)]。降雨日数与气温的相关关系显示,39个站降雨日数均与气温呈正相关(其中11个站具有统计学意义),只有3

个站呈负相关[图8(b)]。雪面雨日数与气温的相关关系较为复杂,图8(c)显示有20个站呈负相关,22个站正相关,且仅有3个站具有统计学意义。可能的原因是,由于构成雪面雨的两个条件(降雨与积雪)对气温上升的响应不同,降雨是随气温升高而增加,而积雪则是相反,因此造成雪面雨日数或增加或减少的复杂变化趋势。为了确定降雨日数的变化是否影响了雪面雨日数,雪面雨日数与降雨日数的相关性如图8(d)所示。所有台站的雪面雨日数与降雨日数均呈正相关,其中有39个站点达到99%以上显著性水平,3个站点达到95%以上显著性水平,这表明雪面雨日数的增加与这些站点的降雨日数的增加密切相关。

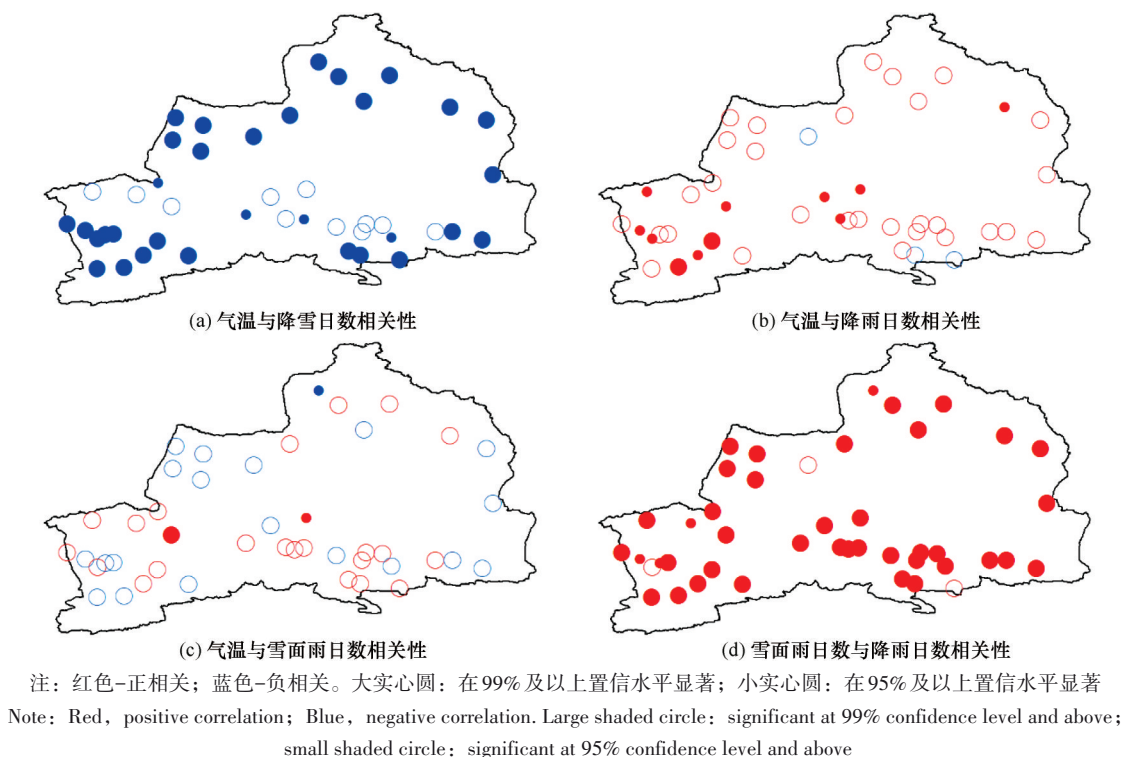


图8 气温与降雪日数(a)、降雨日数(b)、雪面雨日数(c)的相关性,以及雪面雨日数与降雨日数(d)的相关性  
 Fig. 8 Correlation between temperature and snowfall days (a), rainfall days (b), ROS days (c), and correlation between ROS days and rainfall days (d)

### 2.2.2 不同海拔对ROS的影响

为验证雪面雨随海拔高度的变化,将新疆北部地区42个台站按海拔由低到高统计与雪面雨日数和雪面雨量的相关关系如图9(a)和9(b)所示。结果显示,雪面雨日数与雪面雨量均与海拔有显著的正相关,相关系数分别为0.353与0.645,分别在0.05与0.01信度水平上显著相关。由于高海拔地区气温低,积雪期更长,如新疆北部地区海拔最高

站天山大西沟,经过统计年平均积雪日数达到193 d,同时,随着气温升高,大气降水显示出由降雪向降雨转换的变化趋势,因而高海拔地区更容易出现雪面雨事件。

## 3 讨论

雪面雨事件通常发生在积雪持续时间很长的寒冷气候地区,这些地区通常以高纬度、高海拔为



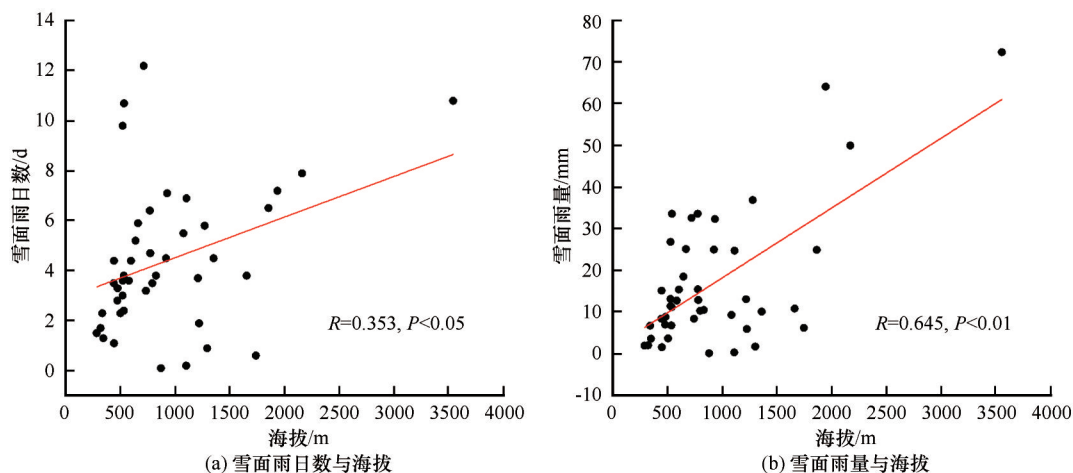


图9 多年平均雪面雨日数(a)、雪面雨量(b)与海拔的散点图  
Fig. 9 Scatter plots of annual average ROS days (a) and ROS amount (b) against elevation

特征<sup>[28-29]</sup>。雪面雨频率的变化由两个主要因素决定:降雨事件和地面积雪日数。随着气温的升高,这两个因素在大多数中高纬度地区具有相反的趋势:降水量增加,积雪日数减少<sup>[29]</sup>,这就导致ROS频率变化的复杂性。众所周知,降水类型直接受近地表气温的影响<sup>[39-41]</sup>,气温的升高增加降雨机率的同时也减少了中纬度地区的降雪日数,从而减少了积雪日数。Pall等<sup>[1]</sup>研究表明,低海拔地区的ROS事件减少,主要受积雪因气候变暖而减少的影响,而高海拔地区的ROS事件则因降雨的增加而增加。在区分高山、高地和低地盆地时,高地盆地最受ROS事件的影响<sup>[15]</sup>。因此,雪面雨频率的变化趋势具有很强的区域差异,如在阿拉斯加,大多数地方的雪面雨频率呈增加趋势,但在阿拉斯加南部和西南部的雪面雨频率则呈减少趋势<sup>[42]</sup>;在落基山脉和美国西部,ROS频率在高海拔地区增加,在低海拔地区减少<sup>[16]</sup>。

以上研究大多在欧洲、北美以及北极地区展开,国内对雪面雨现象的研究还较少<sup>[30]</sup>。对新疆北部地区雪面雨研究表明该地区雪面雨频率呈现出缓慢增加的趋势。此外,新疆北部地区雪面雨日数及雪面雨量均随海拔升高而增加,这也与世界上大多数区域的研究结果一致。本文仅对冷季(10月—次年4月)雪面雨日数进行了分析,下一步将针对新疆整个区域的全年观测记录展开研究,以期揭示高海拔山区(包含暖季)雪面雨事件的时空变化特征。

基于台站观测数据,对新疆北部地区冷季雪面雨时空分布特征有了一定了解。然而由于ROS事件主要发生在高纬度和高海拔地区,而台站大多分布于低海拔地带,监测数据稀缺使得准确确定某次

降水事件是否为雪面雨事件变得困难<sup>[43]</sup>,导致对雪面雨事件的捕捉能力有限。更为全面的研究则需要借助于卫星遥感的大范围监测以及基于遥感数据的ROS事件判定方法,如利用MODIS积雪面积观测数据与卫星降水产品,结合降水相态分离方法,在整个研究区域的格点尺度开展研究,有望获得整个区域更加全面、准确的研究结果。而如何界定雪面雨事件是雪面雨频次及强度变化研究中的前沿和难点问题<sup>[30]</sup>。卫星数据的应用弥补了地面监测设备观测范围有限的不足,而格点降水的估测精度以及降水相态分离技术也成为当前面临的关键问题。目前主要采用基于临界气温的雨雪分离法来确定雪面雨事件并分析其变化趋势,鉴于高海拔地区雨雪分离临界气温的高度时空异质性,相关研究还存在较大的不确定性<sup>[30]</sup>,还需进一步深入研究。

#### 4 结论

基于1960—2015年地面气象站逐日气温、降水量、积雪深度、天气现象等相关数据,通过制定雪面雨判定标准,严格筛选雪面雨事件,对新疆北部地区冷季(10月—次年4月)雪面雨日数的时空变化进行了初步分析,主要结论如下:

(1)气候变暖导致新疆北部地区降雪日数减少,降雨日数增加,1960—2015年新疆北部地区雪面雨日数总体呈现缓慢增加趋势,增加速率为 $0.3 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ;

(2)空间分布上,新疆北部地区雪面雨主要集中于塔城北部、伊犁河谷、乌鲁木齐河源地区,其中塔城地区裕民县最多,年平均雪面雨日数12.2 d;

(3) 相关分析显示雪面雨日数及雪面雨量均与海拔呈显著正相关, 相关系数分别为 0.35 和 0.65, 分别通过了 95% 与 99% 的显著性检验;

(4) 即使在气候最冷的积雪稳定期 (1—2 月份), 新疆北部仍然出现雪面雨事件; 近 30 a 雪面雨量在积雪积累与消融期均呈现出显著增加趋势。

## 参考文献 (References):

- [1] Pall P, Tallaksen L M, Stordal F. A climatology of rain-on-snow events for Norway [J]. *Journal of Climate*, 2019, 32 (20): 6995-7016.
- [2] Rössler O, Froidevaux P, Börst U, et al. Retrospective analysis of a nonforecasted rain-on-snow flood in the Alps—a matter of model limitations or unpredictable nature? [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(6): 2265-2285.
- [3] McCabe G J, Clark M P, Hay L E. Rain-on-snow events in the western United States [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(3): 319-328.
- [4] Pomeroy J W, Fang Xing, Marks D G. The cold rain-on-snow event of June 2013 in the Canadian Rockies—characteristics and diagnosis [J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30 (17): 2899-2914.
- [5] 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.
- [6] Conway H, Raymond C F. Snow stability during rain [J]. *Journal of Glaciology*, 1993, 39(133): 635-642.
- [7] Nyberg R. Observations of slushflows and their geomorphological effects in the Swedish Mountain area [J]. *Geografiska Annaler Series A, Physical Geography*, 1989, 71(3/4): 185.
- [8] Onesti L J. Slushflow release mechanism: a first approximation [C]//In *Avalanche Formation, Movement and Effect*; IAHS; Wallingford, UK, 1987: 331-336.
- [9] Sezen C, Šraj M, Medved A, et al. Investigation of rain-on-snow floods under climate change [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(4): 1242.
- [10] Putkonen J, Roe G. Rain-on-snow events impact soil temperatures and affect ungulate survival [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(4): 1188.
- [11] Rennert K J, Roe G, Putkonen J, et al. Soil thermal and ecological impacts of rain on snow events in the circumpolar Arctic [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(9): 2302-2315.
- [12] Leathers D J, Kluck D R, Kroczyński S. The severe flooding event of January 1996 across north-central Pennsylvania [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79 (5): 785-797.
- [13] Sui Jueyi, Koehler G. Rain-on-snow induced flood events in Southern Germany [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 252(1/2/3/4): 205-220.
- [14] Pradhanang S M, Frei A, Zion M, et al. Rain-on-snow runoff events in New York [J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27 (21): 3035-3049.
- [15] Freudiger D, Kohn I, Stahl K, et al. Large-scale analysis of changing frequencies of rain-on-snow events with flood-generation potential [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(7): 2695-2709.
- [16] Musselman K N, Lehner F, Ikeda K, et al. Projected increases and shifts in rain-on-snow flood risk over western North America [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(9): 808-812.
- [17] Li Dongyue, Lettenmaier D P, Margulis S A, et al. The role of rain-on-snow in flooding over the conterminous United States [J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(11): 8492-8513.
- [18] Sobota I, Weckwerth P, Grajewski T. Rain-on-snow (ROS) events and their relations to snowpack and ice layer changes on small glaciers in Svalbard, the high Arctic [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125279.
- [19] Dou Tingfeng, Xiao Cunde, Liu Jiping, et al. Trends and spatial variation in rain-on-snow events over the Arctic Ocean during the early melt season [J]. *The Cryosphere*, 2021, 15(2): 883-895.
- [20] Garvelmann J, Pohl S, Weiler M. Variability of observed energy fluxes during rain-on-snow and clear sky snowmelt in a mid-latitude mountain environment [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, 15(3): 1220-1237.
- [21] Ocampo Melgar D, Meza F J. Exploring the fingerprints of past rain-on-snow events in a central Andean Mountain range basin using satellite imagery [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12 (24): 4173.
- [22] Würzer S, Wever N, Juras R, et al. Modelling liquid water transport in snow under rain-on-snow conditions – considering preferential flow [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(3): 1741-1756.
- [23] Poschold B, Zscheischler J, Sillmann J, et al. Climate change effects on hydrometeorological compound events over southern Norway [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2020, 28: 100253.
- [24] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions [J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 303-309.
- [25] Beniston M, Stoffel M. Rain-on-snow events, floods and climate change in the Alps: Events may increase with warming up to 4 °C and decrease thereafter [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 228-236.
- [26] Stewart I T. Changes in snowpack and snowmelt runoff for key mountain regions [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(1): 78-94.
- [27] Zhao Qiudong, Zhao Chuancheng, Qin Yan, et al. The change features and future trend of snowfall and extreme snowfall in the arid areas of Northwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 81-90. [赵求东, 赵传成, 秦艳, 等. 中国西北干旱区降雪和极端降雪变化特征及未来趋势 [J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 81-90.]
- [28] Surfleet C G, Tullos D. Variability in effect of climate change on rain-on-snow peak flow events in a temperate climate [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 479: 24-34.
- [29] Ye Hengchun, Yang Daqing, Robinson D. Winter rain on snow and its association with air temperature in northern Eurasia [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(15): 2728-2736.
- [30] Chen Rensheng, Shen Yongping, Mao Weiwei, et al. Progress and issues on key technologies in forecasting of snowmelt flood disaster in arid areas, northwest China [J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(3): 233-244. [陈仁升, 沈永平, 毛炜峰, 等. 西北干旱区融雪洪水灾害预报预警技术: 进展与展望 [J]. *地球科学进展*, 2021, 36(3): 233-244.]
- [31] Wu Jian, Li Lan. A rain-on-snow mixed flood forecast model and its application [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2007, 40(6): 20-23. [武见, 李兰. 一个雨雪混合洪水预报模型及其应用 [J]. *武汉大学学报 (工学版)*, 2007, 40(6):

- 20-23. ]
- [32] Luo Guangxiao, Zhang Yunhui, Wang Yong, et al. Analysis of contributing factors to flood caused by rainstorm and Melting in kerliker mountain of Hami in July 1999 [J]. Bimonthly of Xinjiang Meteorology, 2000(4): 11-13. [骆光晓, 张云惠, 王勇, 等. 喀尔里克山“99·7”暴雨融雪混合型洪水成因分析[J]. 新疆气象, 2000(4): 11-13. ]
- [33] Zhang Junlan, Mao Weiyi, Wang Jinmin, et al. A new technique of forecast and service of heavy rainfall and snow-melted flood in Weigan River area [J]. Meteorological Monthly, 2004, 30(3): 48-52. [张俊岚, 毛炜峰, 王金民, 等. 渭干河流域暴雨融雪型洪水预报服务新技术研究[J]. 气象, 2004, 30(3): 48-52. ]
- [34] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang(II): Hazards effects[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1355-1370. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1355-1370. ]
- [35] Ablimitjan Ablikim, Chen Chunyan, Yusup Abdula, et al. The temporal and spatial distribution features of snowmelt flood events in Xinjiang from 2001 to 2012[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 226-232. [阿不力米提江·阿布力克木, 陈春艳, 玉素甫·阿不都拉, 等. 2001—2012年新疆融雪型洪水时空分布特征[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 226-232. ]
- [36] Mao Weiyi, Fan Jing, Shen Yongping, et al. Variations of extreme flood of the rivers in Xinjiang region and some typical watersheds from Tianshan mountains and their response to climate change in recent 50 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(5): 1037-1046. [毛炜峰, 樊静, 沈永平, 等. 近50 a来新疆区域与天山典型流域极端洪水变化特征及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2012, 34(5): 1037-1046. ]
- [37] Zhao Quidong, Zhao Chuancheng, Qin Yan, et al. Response of the hydrological processes to climate change in the Muzati River basin with high glacierization, southern slope of the Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4): 1285-1298. [赵求东, 赵传成, 秦艳, 等. 天山南坡高冰川覆盖率的木扎提河流域水文过程对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4): 1285-1298. ]
- [38] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [39] Auer A H. The rain versus snow threshold temperatures [J]. Weatherwise, 1974, 27(2): 67.
- [40] Rohrer M D. Determination of the transition air temperature from snow to rain and intensity of precipitation[M]//In International Workshop on Precipitation Measurement, WMO TD No. 328, Sevruk B (ed.), St. Moritz, Switzerland, Instruments and Observing Methods Report No. 48. World Meteorological Organization: Geneva, 1989: 475-482.
- [41] Fassnacht S R, Kouwen N, Soulis E D. Surface temperature adjustments to improve weather radar representation of multi-temporal winter precipitation accumulations[J]. Journal of Hydrology, 2001, 253(1/2/3/4): 148-168.
- [42] Bieniek P A, Bhatt U S, Walsh J E, et al. Assessment of Alaska rain-on-snow events using dynamical downscaling[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2018, 57(8): 1847-1863.
- [43] Wang Ting, Li Zhaoguo, Lü Shihua, et al. Study on the effects of snow cover on heat transport in land surface processes over Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(5): 920-934. [王婷, 李照国, 吕世华, 等. 青藏高原积雪对陆面过程热量输送的影响研究[J]. 高原气象, 2019, 38(5): 920-934. ]



## Spatiotemporal variation of rain-on-snow days in northern Xinjiang

LU Xinyu<sup>1</sup>, CHEN Rensheng<sup>2</sup>, LIU Yan<sup>1</sup>, WANG Xiuqin<sup>3</sup>, SONG Zhiguo<sup>4</sup>

(1. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China; 2. Northwest

Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. Xinjiang Meteorological Information Center, Urumqi 830002, China; 4. Yishui

meteorological bureau of Shandong, Yishui 276400, Shandong, China)

**Abstract:** Many extreme floods are caused by the rain-on-snow (ROS) events in the world. Under global warming, the rain-on-snow (ROS) event and its flood have increased and would increase in the future. It is of great significance to understand the spatiotemporal variation of ROS for flood control and disaster reduction. Based on the daily temperature, precipitation, snow depth, weather phenomenon and other meteorological observation data of 42 national meteorological stations in northern Xinjiang from 1960 to 2015, the parameterization scheme of rain-on-snow (ROS) events was determined by using precipitation type, ground state and snow depth records. On this basis, the spatiotemporal variation characteristics of ROS days and their relationship with temperature and elevation in northern Xinjiang were analyzed. The results show that during the last 56 years, the rate of  $0.3 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$  of ROS days in northern Xinjiang has been increasing slowly; In terms of spatial distribution, ROS in northern Xinjiang is mainly concentrated in the north of Tacheng, Ili River Valley and the headwaters of Urumqi River. Yumin county has the most ROS events, with an annual ROS day of 12.2 d; Correlation analysis showed there was a significant positive correlation between the number of ROS days, ROS amount and altitude. This study is expected to improve the scientific understanding of the snow surface rain event, which is an important phenomenon of inducing rain and snow mixed flood in arid area of Xinjiang, and provide a reference for the analysis of disaster causing flood process and flood monitoring and early warning in our region.

**Key words:** rain-on-snow (ROS); rainfall; snow cover; spatiotemporal variation; northern Xinjiang

(责任编辑：钟歆玥；编辑：周成林)