

中国天山冰川变化脆弱性研究

蔡兴冉^{1,2}, 李忠勤¹, 张 慧¹, 徐春海^{1,3}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院西北生态环境资源研究院 国家冰川冻土沙漠科学数据中心, 兰州 730000)

摘要: 冰川是重要的淡水资源, 对社会经济发展和生态环境影响显著, 而其变化的脆弱性也关乎区域生态服务和经济可持续发展。本文以中国天山为例, 基于脆弱性的暴露度、敏感性、适应能力构建涵盖自然地理特征、人口状况、社会经济水平、农业发展和社会服务等因素的冰川变化脆弱性框架, 并以此针对性构建评价指标体系, 探析天山冰川变化脆弱性的空间特征, 采用地理探测器模型探讨自然、社会、经济和人口等因素对冰川变化适应能力的影响及交互作用。结果表明: ① 脆弱性等级由西部地区向东部地区呈降低趋势, 且水平差异显著。天山东部地区脆弱性最低、中部地区次之、西部地区较高。② 暴露度、敏感性和适应能力在空间上分别存在明显正相关与负相关, 表明区域范围内冰川变化具有高暴露、高敏感地区往往适应能力较低, 进而导致脆弱性较高; 反之, 脆弱性较低。③ 天山应对冰川变化能力的空间异质性是自然、社会、经济和人口因素共同作用的结果。其中, 第二、三产业产值、城镇人口数、城镇固定资产投资与年末单位从业人员等因素具有主导作用。

关键词: 冰川变化; 脆弱性; 适应能力; 地理探测器; 中国天山

DOI: 10.11821/dlxb202109015

1 引言

作为“固体水库”的冰川, 在新疆水资源构成和河川径流调节方面起着双重作用。一方面, 冰川融水在地表径流中占有重要比重; 另一方面, 冰川在年际和年内两种尺度上对河川径流进行“削峰填谷”作用。冰川在提供丰富淡水资源同时也易引发冰川洪水、冰湖溃决等灾害, 威胁下游地区的社会经济发展及人民生命财产安全^[1]。气候变暖背景下, 全球冰川普遍处退缩状态, 冰川变化及其影响引起了国内外学者的广泛关注, 如何应对冰川变化所产生的一系列(生态、自然、社会经济方面)影响, 已成为当下亟需面对的重要现实和战略问题。而冰川及其变化的脆弱性研究是制定应对冰川变化措施的关键^[2]。

“脆弱性”概念由法国学者 Albinet 和 Margat 于 20 世纪 70 年代提出, 被用于地下水系统评估^[3]。随后在脆弱性概念研究的不断拓展与多学科相互交融的背景下, 脆弱性内涵朝

收稿日期: 2020-06-05; 修订日期: 2021-04-16

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20020102, XDA20060201); 国家自然科学基金项目(41761134093, 41471058, 42001067); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0201); 国家冰川冻土沙漠科学数据中心开放基金(20D03) [Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA20020102, No.XDA20060201; National Natural Science Foundation of China, No.41761134093, No.41471058, No.42001067; The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program, No.2019QZKK0201; National Cryosphere Desert Data Center, No.20D03]

作者简介: 蔡兴冉(1993-), 女, 山东济宁人, 博士生, 主要从事冰冻圈与可持续发展研究。E-mail: xingrancai@126.com

通讯作者: 李忠勤(1962-), 男, 甘肃兰州人, 研究员, 博导, 主要从事冰冻圈与环境变化研究。E-mail: lizq@lzb.ac.cn

着一维到多维、简单到复杂的方向发展。冰川变化脆弱性是在冰冻圈变化脆弱性基础上引申而来,国际上关于冰川变化脆弱性研究尚处于起步阶段。国内自2007年逐步展开冰川变化脆弱性研究,尚处于探索阶段。目前冰川脆弱性研究主要包括:冰川自身对气候变化的脆弱性和冰川变化脆弱性即各类系统对冰川变化负面影响的敏感程度,由暴露度、敏感性、适应能力构成^[2]。基于系统对冰冻圈变化脆弱性的研究成果主要集中于以下4个方面:①对冰冻圈变化的影响及脆弱性进行系统梳理,提出关键问题并明确研究方向。如丁永建等^[4]、王世金等^[5]基于冰冻圈与地球其他圈层的相互作用,系统阐述了冰冻圈变化对区域社会经济的影响。②冰冻圈变化脆弱性评估体系的构建与度量,不同学者根据研究区特点,科学、客观地选择评估因子,并采用相关赋权方法计算脆弱性指数。常采用的有特尔菲法^[6]、模糊模式交叉迭代法^[7]和主成分分析方法^[8]等。③不同系统对冰冻圈变化的脆弱性研究,其中包括人类环境系统、社会经济系统与水资源系统等,如姚檀栋等^[9]、He等^[10]研究了冰川变化对区域水循环和人类社会的影响。④冰冻圈变化脆弱性与适应结合研究,脆弱性研究是连接影响与适应的纽带,形成了“影响—脆弱性—适应对策”研究主线。Bhadwal等^[11]、Grossi等^[12]、Pan^[13]及Thorsteinsson等^[14]对印度北部喜马拉雅山、曼陀罗和叶尔羌河流域冰川变化影响下的水资源系统脆弱性进行了评估,并基于此制定相应的适应方案。可见已有较多成果将冰冻圈作为一个整体研究其脆弱性,而针对冰冻圈单一要素—冰川变化脆弱性研究较少。

天山深居亚欧大陆内部,是中国现代冰川主要分布区之一,丰富的冰川资源为新疆社会经济发展、自然资源利用以及特色绿洲农业发展等提供了有力的水资源保障^[15]。全球变暖驱动下,天山冰川普遍处于物质亏损状态,尤其自20世纪80年代以来呈现加速消融^[16]。2090年前中国天山北麓诸河80%的冰川、伊犁河流域88.6%的冰川会消失殆尽,在此之后会导致冰川融水径流锐减,大大削弱对河川径流的调节作用,间接影响该区水资源的可持续利用^[17]。加强该区冰川变化脆弱性研究对区域水资源、生态环境及社会经济发展等具有重要现实意义。然而目前天山地区的冰川研究主要集中于冰川面积^[18-19]、冰川储量^[20-21]、冰川径流^[22-24]、冰川物质平衡^[25-26]以及冰川消融对水资源的影响^[27-28]等方面,亟待开展脆弱性研究。为此,本文以该区为例,从暴露度、敏感性、适应能力对冰川变化的脆弱性进行分析,探讨冰川变化脆弱性各维度之间的相互关系及其对冰川变化适应能力的影响,以期提高对中国天山冰川变化脆弱性的认识与理解,为应对冰川变化及其影响提供科学指导与决策支持。

2 研究区概况

中国天山又称东天山,呈东西走向,西起中国与吉尔吉斯斯坦边界,南临塔里木盆地,北接准噶尔盆地,东至哈密市以东星星峡戈壁,长约1700 km^[29]。天山山系由3列山脉组成,依次为北天山、中天山和南天山,将新疆分成南北两部分,地貌上与昆仑山—塔里木盆地—准噶尔盆地—阿勒泰山共同形成“三山夹两盆”的地貌特征,垂直结构明显,以阶梯地貌为主,山脉平均海拔4000 m以上,托木尔峰为其最高峰(7443.8 m)。受其独特地理位置的影响,天山山区大陆性气候显著,气温和降水从西北至东南呈递减趋势^[30]。年内降水主要集中于夏季,年最大降水量为600~800 mm,最小降水量约为150 mm,多年平均降水量介于250~300 mm^[31]。气温空间差异显著,多年平均气温约为5.0 °C,南坡年平均气温明显高于北坡,分别为7.5~10.0 °C和2.5~5.0 °C^[32]。据第二次中国

冰川编目, 天山共发育冰川 7934 条, 面积约为 7179.78 km^2 , 储量约为 756.48 km^3 ^[33]。天山山区也是众多河川径流的发源地, 包括天山北坡的博尔塔拉河、伊犁河、精河以及南坡的阿克苏河、开都河、孔雀河等。天山冰川分属于伊犁河内流水系、塔里木内流水系、吐鲁番—哈密内流水系和准噶尔内流水系, 其中准噶尔内流水系的冰川数量最多, 吐鲁番—哈密内流水系的冰川数量最少^[34]。行政区划上, 天山冰川分布于新疆维吾尔自治区的“一市(乌鲁木齐市)、四区(阿克苏地区、塔城地区、哈密地区和吐鲁番地区)、五自治州(昌吉回族自治州、巴音郭楞蒙古自治州、博尔塔拉蒙古自治州、克孜勒苏柯尔克孜自治州和伊犁哈萨克自治州)”, 其中阿克苏地区冰川面积总量最大(2988.60 km^2), 吐鲁番地区最小(16.40 km^2), 共涉及 34 个县市。

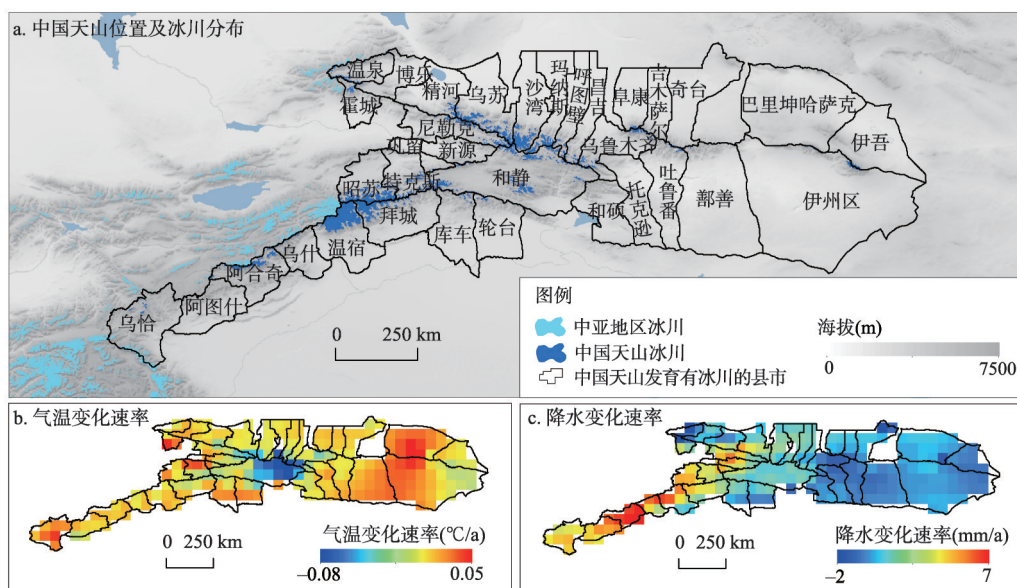


图1 天山冰川分布及1961—2010年气温和降水变化速率

Fig. 1 The glacier distribution of Chinese Tianshan Mountains and its air temperature and precipitation change rates in 1961-2010

3 数据及方法

3.1 数据

本文使用的数据包括冰川数据、数字高程模型 (DEM)、气象数据和社会经济数据。其中冰川数据来自第一次和第二次中国冰川编目, 第一次冰川编目的数据为 1959—1980 年航拍的 1:5 万、1:10 万及 1:2.5 万地形图, 在量测之前, 先利用航空像片校准地形图上的冰川轮廓, 并基于野外考察资料对地形图进行全面修订和校对。第二次冰川编目采用当前国际通用的遥感和 GIS 方法, 以 Landsat TM/ETM+ 遥感卫星数据为冰川边界描绘主要数据源, 并以自主研发的冰川区山脊线提取方法来提取冰川区分冰岭, 结合人工修订, 进而形成最终的冰川边界数据。第二次冰川编目中的冰川面积绝对误差值和相对误差值分别为 $\pm 1411 \text{ km}^2$ 和 3.2%^[35]。本文使用冰川变化数据主要依据邢武成等结果^[18]。第二次中国冰川编目天山地区冰川影像获取时间为 2006 年、2007 年、2009 年和 2010 年,

其中 2006 年影像勾绘的冰川条数只有 0.6%，大部分冰川主要涉及 2007 年、2009 年和 2010 年的影像。考虑到冰川每年的面积变化不大，同时也为了便于统计与计算，本文以 1960 年和 2010 年分别作为天山山区第一、二次冰川编目年份^[33]，冰川编目数据来自国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (<http://www.ncdc.ac.cn/>)，主要用于获取冰川面积和储量变化参数。数字高程模型为 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) DEM，空间分辨率为 30 m，主要是对天山地区冰川海拔高度分布进行计算，该数据源于美国地质调查局 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)。此外，本文采用国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn>) 提供的 1961—2010 年中国地面气温与降水 (月尺度) 数据集 (空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$)，以反映天山地区气温与降水时空变化特征。需要说明的是文献资料对天山山区范围定义不一，存在一定的不确定性，因而难以准确划分天山分布涉及的县市数量。为使文章表达更加严谨，本文主要基于第二次中国冰川编目中国境内天山各县市冰川分布状况确定冰川分布的 34 个县市。社会经济数据为冰川分布的 34 个县市 (不包括生产建设兵团) 2010 年各项指标，分别来源于《中国县域统计年鉴》《新疆统计年鉴》《吐鲁番统计年鉴》《伊犁哈萨克自治州统计年鉴》《乌鲁木齐统计年鉴》以及其他县 (市) 统计年鉴、国民经济与社会发展统计公报。

3.2 研究方法

3.2.1 指标体系构建 在客观性、科学性、可比性和可操作性原则指导下，本文从人地关系视角出发，采用目标层—准则层—指标层逐级递减的方式组织研究框架，将自然地理特征、人口状况、社会经济水平等因素纳入冰川变化脆弱性评估体系，综合评估天山地区冰川变化脆弱性。评估指标体系和评估框架见表 1 和图 2。

表 1 天山冰川变化脆弱性评估指标体系

Tab. 1 Vulnerability assessment index system of glacier change in Chinese Tianshan Mountains			
准则层	指标层	综合权重	指标说明
暴露度	冰川面积相对变化率(%)	0.11	以 2 期冰川面积差值反映面积变化 ^[18]
	冰川储量相对变化率(%)	0.02	以 2 期冰川储量差值反映储量变化 ^[27]
	冰川末端海拔(m)	0.03	反映冰川冰舌末端高度变化
	冰川海拔分布(m)	0.03	基于 DEM 数据对冰川海拔分布统计,以反映冰川发育条件
	城镇化率(%)	0.04	反映城镇化进程受冰川变化所带来的间接影响
	地区 GDP(万元)	0.07	反映行政区整体经济发展水平
	人口密度(人/km ²)	0.06	反映冰川变化影响下区域范围内人口的密集程度
敏感性	气温变化率(°C/10a)	0.03	反映气温变化
	降水变化率(mm/10a)	0.05	反映降水变化
	粮食总产量(t)	0.07	反映行政区粮食生产能力
	人均有效灌溉面积(hm ²)	0.04	反映地区水资源丰富程度及其在农业生产过程中的稳定度
适应能力	农村居民人均纯收入(万元)	0.02	反映农村居民生产水平与生活质量的变化
	人均 GDP(万元)	0.09	反映地区经济运行状况与人民生活水平
	城镇固定资产投资完成额(万元)	0.08	反映区域资本投资规模、结构与发展速度
	教育水平(人)	0.06	采用普通中学在校生数,反映教育普及程度与教育设施水平
	医疗水平(张)	0.07	采用医院床位数量,反映医疗基础设施完备水平
	农业生产总值(万元)	0.04	反映农业生产规模与水平
	第二产业增加值(万元)	0.10	反映第二产业发展所带来的收益

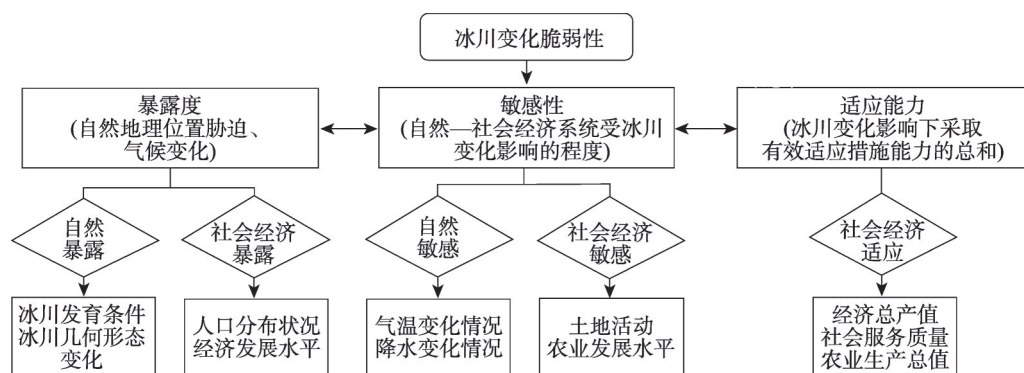


图2 天山冰川变化脆弱性评估框架

Fig. 2 Vulnerability assessment framework of glacier change in Chinese Tianshan Mountains

(1) 暴露度指系统受外在压力或胁迫的不利程度。冰川变化的暴露度为自然地理位置胁迫、气候变化而导致冰川的承受压力以及社会经济承担能力共同作用的结果，包括自然暴露与社会经济暴露。本文采用冰舌末端高度、海拔分布反映冰川发育的自然条件，冰川面积变化率和储量变化率表征冰川变化的暴露强度，共同衡量区域自然暴露度。考虑到天山各县市经济发展现状、发展速率差异、城镇化进程及人口分布不均等因素，社会经济暴露指标选取地区GDP、城镇化率和人口密度。

(2) 敏感性指系统中各要素对冰川变化的响应程度。研究将冰川变化的敏感性与气候要素、农业活动相联系，关注以人为本的农业活动中水资源利用受到影响或改变的程度。一方面，气候要素中气温、降水与冰川密切相关，气温决定冰川消融，固态降水决定冰川积累，二者共同作用决定了冰川的形成、发育与演化^[4]。另一方面，冰川资源对其径流补给率直接影响农业活动中水资源的利用。因此，本文选取天山各县市的年均气温变化率、年均降水变化率、粮食总产量、人均有效灌溉面积表征冰川变化的敏感性。

(3) 适应能力指人类主体在面对实际或预测的冰川变化影响下，采取有效措施的总和。本研究主要考虑社会、经济系统双重作用下冰川变化的适应能力。人均GDP、城镇固定资产投资完成额与第二产业增加值反映了区域经济整体发展水平的高低以及是否具有采取高水平、高科技适应措施的经济能力。此外，教育与医疗水平间接反映区域经济实力，为此将其纳入适应能力评价体系。农村居民人均纯收入与农业生产总值反映了区域农业发展水平，冰川变化会引起水资源的变化，而水资源是农业发展的决定要素，为此水资源系统的变化对农业活动具有主导作用。

3.2.2 脆弱性评估模型 根据相关学者研究，脆弱性是由系统暴露度、敏感性和适应能力构成的函数，但由于各维度指标数据的计量单位以及数值大小不同，在进行脆弱性分析之前，为实现数据之间的可比性，在计算过程中采用极差标准化方法对正负指标数据进行标准化处理，以实现数据的无量纲化，并采用改进熵值法确定指标权重（表1）^[36]。脆弱性指数 V 计算为：

$$V = (E \times S) / A \quad (1)$$

式中： E 为暴露度； S 为敏感性； A 为适应能力。该模型反映了脆弱性与3个维度之间的内在逻辑关系，系统暴露度越高，敏感性越强，适应能力越小，系统脆弱性越大；反之，系统脆弱性越小。

3.2.3 空间自相关

(1) 全局自相关

为对天山地区 34 个县市空间整体特征进行分析, 采用全局自相关模型分析 34 个县市冰川变化脆弱性的整体分布情况, 以判断天山冰川变化脆弱性在空间上是否具有集聚性。依据相关脆弱性研究, 常采用的检验统计量是 Moran's I 指数^[37]:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (i \neq j) \quad (2)$$

式中: x_i 、 x_j 分别为空间对象 i 、 j 的冰川变化的脆弱性指数; w_{ij} 为空间权重, 采用邻接标准定义, 即当 i 和 j 邻接时, $w_{ij} = 1$, 否则 $w_{ij} = 0$; n 为空间对象数; Moran's I 取值范围在 $[-1, 1]$, 大于 0 为正相关, 小于 0 为负相关, 等于 0 为不相关。

(2) 双变量空间自相关

为描述多变量间的相关空间分布特征, 采用 Anselin 提出的双变量空间自相关模型^[38], 检验暴露度和敏感性、暴露度和适应能力以及敏感性和适应能力的空间相关性:

$$I_{df}^i = Z_d^i \sum_{j=1}^n w_{ij} Z_f^j \quad (3)$$

$$Z_d^i = \frac{x_d^i - \bar{x}_d}{\sigma_d}, Z_f^j = \frac{x_f^j - \bar{x}_f}{\sigma_f} \quad (4)$$

式中: w_{ij} 为空间对象权重; Z_d^i 是空间对象 i 的属性 d 值; Z_f^j 是空间对象 j 的属性 f 值; \bar{x}_d 、 \bar{x}_f 分别为属性 d 、 f 的平均值; σ_d 、 σ_f 分别为属性 d 、 f 的方差; n 为空间对象数; d 为暴露度或敏感性指数; f 为敏感性或适应能力指数。

3.2.4 地理探测器模型 地理探测器模型是由王劲峰等提出的分析空间分异性并探测其内部主导因素的统计学方法, 主要包括风险探测、因子探测、交互探测与生态探测 4 个部分, 其本质思想是若因变量对自变量的发展具有重要作用, 则因变量与自变量在空间上具有相似的分布特征或空间变化具有一定的一致性^[39]。本文中地理探测器模型主要涉及因子探测与交互探测。

(1) 因子探测

因子探测是采用定量化的方法分析影响因素对冰川变化适应能力的解释程度, 即各影响因素在适应能力中所起到的重要性大小, 用 $P_{D,E}$ 值表示:

$$P_{D,E} = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{j=1}^F N_j \sigma_j^2 \quad (5)$$

式中: $P_{D,E}$ 为影响因子 D 的因子解释力, $P_{D,E}$ 值在 0 到 1 之间, $P_{D,E}$ 值越趋近于 1, 表明影响因子 D 对适应能力影响程度越大; N 为冰川变化适应能力; σ 为冰川变化适应能力方差; 将研究区影响因素分为 F 层, 用 $j = 1, 2, \dots, F$ 表示, 则 N_j 和 σ_j^2 分别为 j 层天山各县市冰川变化适应能力和方差。

(2) 交互探测

交互探测是识别影响因素之间是否具有交互作用, 即影响因子 a 与影响因子 b 共同作用时对冰川变化适应能力的解释力是否具有增强或减弱作用, 或某因子单独对冰川变化适应能力发挥作用, 因子之间相互独立, 不存在相互影响。确定因子间是否具有交互作用, 采用表 2 中的公式计算^[39]。

4 结果与分析

表2 交互探测类型

Tab. 2 Type of interaction detection

4.1 中国天山冰川变化脆弱性空间分异特征

根据冰川变化脆弱性模型计算出天山各县市冰川变化脆弱性指数, 运用ArcGIS软件中自然断点法, 将脆弱性、暴露度、敏感性以及适应能力指数由低至高依次划分为5个等级, 得到天山各县市冰川变化脆弱性空间分布图。

类型		公式
增强	普通	$P_{D,E}(D_1 \cap D_2) > P_{D,E}(D_1) \text{ 或 } P_{D,E}(D_2)$
	双线性	$P_{D,E}(D_1 \cap D_2) > P_{D,E}(D_1) \text{ 且 } P_{D,E}(D_2)$
	非线性	$P_{D,E}(D_1 \cap D_2) > P_{D,E}(D_1) + P_{D,E}(D_2)$
削弱	普通	$P_{D,E}(D_1 \cap D_2) < P_{D,E}(D_1) + P_{D,E}(D_2)$
	双线性	$P_{D,E}(D_1 \cap D_2) < P_{D,E}(D_1) \text{ 或 } P_{D,E}(D_2)$
	非线性	$P_{D,E}(D_1 \cap D_2) < P_{D,E}(D_1) \text{ 且 } P_{D,E}(D_2)$
相互独立	普通	$P_{D,E}(D_1 \cap D_2) = P_{D,E}(D_1) + P_{D,E}(D_2)$

4.1.1 脆弱性等级由西部地区向东部地区降低, 水平差异显著 天山冰川变化脆弱性整体呈现出由西向东降低趋势, 西部地区以高与较高等级为主, 东部地区以低与较低等级为主。县市上, 高与较高脆弱性仅分布在西部的阿合奇县与乌恰县, 脆弱性指数分别为0.66和0.36; 中等脆弱性主要分布在西部的阿图什市、乌什县、温宿县以及中部的温泉县, 脆弱性指数分别为0.13、0.16、0.19和0.13; 较低与低脆弱性主要分布在中部的昌吉市、和静县等以及东部的鄯善县、奇台县和伊吾县等, 脆弱性指数分别为0.02、0.04、0.02、0.08和0.11。整体上天山地区冰川变化脆弱性主要集中在低、较低和中等脆弱3个等级, 不同脆弱性等级县市个数为: 低度脆弱 > 较低脆弱 > 中等脆弱 > 较高脆弱 = 高度脆弱, 其对应县市个数占比分别为50.00%、32.35%、11.77%、2.94%和2.94% (图3a)。

4.1.2 暴露度高值集聚西、中地区, 低值分散分布 天山冰川变化脆弱性主要来源于自然暴露与社会经济暴露, 如气候变暖背景下冰川面积、储量变化以及地区生产总值的增减、人口快速增长等自然与社会条件的制约。由图3b所示, 暴露度在天山西部、中部地区与东部地区差异明显, 暴露度高值集中分布在西部的阿合奇县和温宿县以及中部的乌苏县、沙湾县和昌吉市, 暴露度指数分别为0.55、0.52、0.50、0.58和0.52; 较高值集聚分布在中部的玛纳斯县、和静县、库车县等, 暴露度指数分别为0.44、0.41和0.34。中等值及以下集中分布在东部的吐鲁番市、鄯善县、伊吾县等, 分散分布在中部地区的新源县、特克斯县、呼图壁县等。通过对天山冰川变化暴露度高低进行排序, 结果表明天山冰川变化暴露度普遍较高, 中等暴露度以上县市个数占总县市的61.76%。

4.1.3 东、西部地区高敏感, 中部地区低敏感 天山冰川变化的敏感性呈现出东、西部高和中部低的空间分布格局 (图3c)。“东、西”为高和较高敏感性县市集聚区, “西”指西部地区的乌恰县—库车县连线, 敏感性最高的是温宿县, 指数为0.52; “东”指东部地区的伊吾县—沙湾县连线, 敏感性最高的是奇台县, 指数为0.78。中部地区以中等及其以上敏感性为主, 敏感性最高的是乌什县, 指数为0.40。整体上天山冰川变化的敏感性以中等敏感性为主, 县市个数占总县市的32.35%; 其次是低与较低敏感性, 分别占26.47%和23.53%; 最后是高与较高敏感性, 共占17.65%, 主要分布在冰川面积较少且以小冰川为主的区域。

4.1.4 适应能力由西—中—东呈圈状递增 天山冰川变化脆弱性的应对能力空间结构特征与脆弱性等级相反, 呈现出由西—中—东圈状递增分布格局 (图3d)。该格局中, “西”指天山适应能力低、较低的区域, “中”指冰川分布较为集中且适应能力中等、高的区域, “东”指冰川零星分布且适应能力高、较高的区域。从县市来看, 西部地区的阿合奇

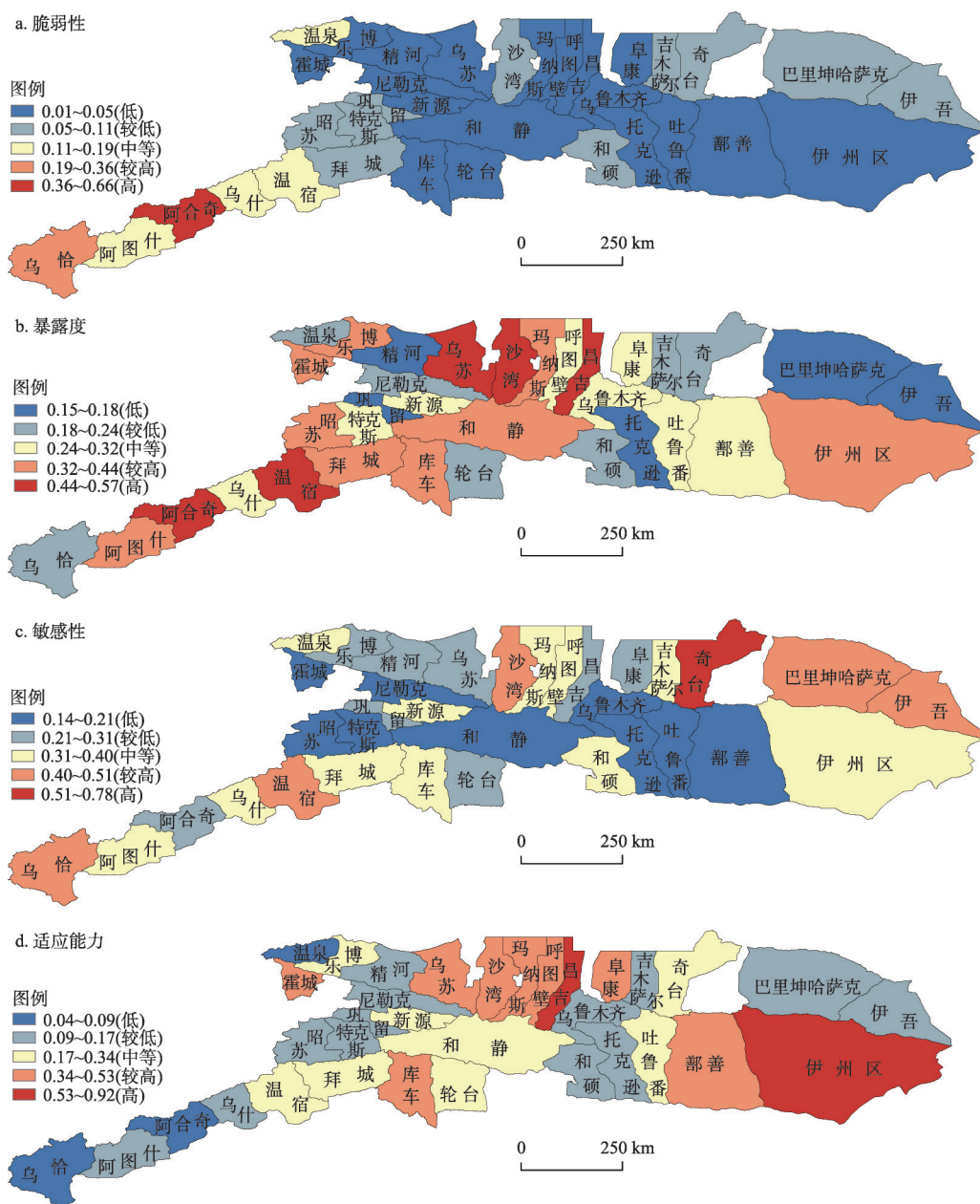


图3 天山冰川变化脆弱性空间分布

Fig. 3 Spatially distributed vulnerability levels of glacier change in Chinese Tianshan Mountains

县、乌恰县适应能力最低，中部地区的昌吉市、玛纳斯县、沙湾县等适应能力较高，东部地区的伊州区、鄯善县等适应能力最高。天山各县市适应能力个数排序为：较低适应>中等适应=较高适应>低适应>高适应，对应县市个数分别为13、8、8、3和2，总体上天山对冰川变化的适应能力普遍较低，以中等及其以下适应能力为主。

综上所述，天山西部地区对冰川变化具有高暴露、高敏感的系统环境，有最低水平的适应能力，冰川变化的脆弱性较高；中部地区处于高暴露的系统环境，但敏感性较

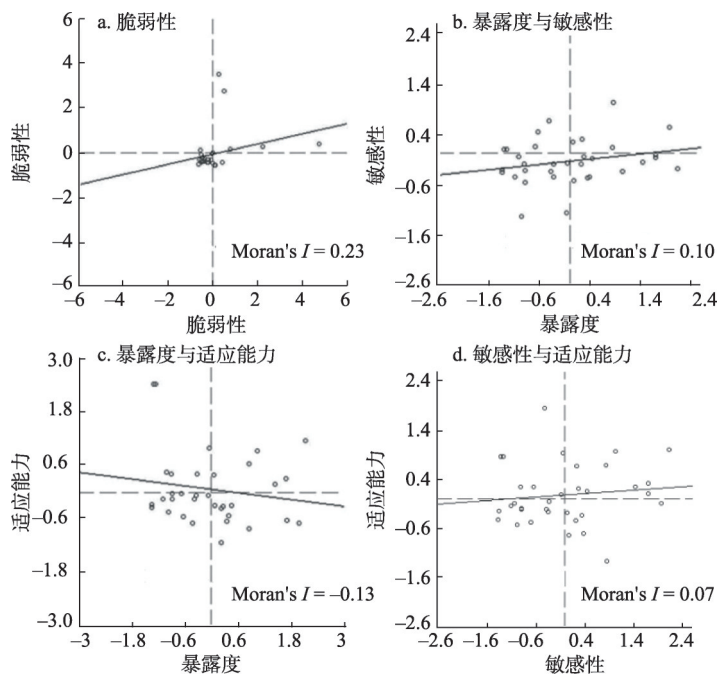


图4 天山冰川变化脆弱性及各维度空间关系

Fig. 4 Spatial relationship between the vulnerability of glacier change and different dimensions in Chinese Tianshan Mountains

低, 有一定应对冰川变化影响的适应能力, 冰川变化的脆弱性较低; 东部地区处在低暴露、高敏感的系统环境, 有应对冰川变化影响的适应能力, 在全区域范围内脆弱性最低。

4.2 空间全局自相关特征 选择Moran's I 指数与散点图对天山34个县市冰川变化脆弱性指数进行空间全局自相关分析, 天山冰川变化脆弱性Moran's I 指数为0.23, 通过0.01水平的显著性检验, Z 值为2.77, 表明天山冰川变化脆弱性存在显著的空间正相关关系, 大部分脆弱性指数散点分布于第一和三象限, 只有较少脆弱性指数分布于第二、四象限(图4a), 即冰川变化脆弱性指数在区域内存在高指数与高指数相邻, 低指数与低指数相邻的集聚状态与相互依赖性。

为研究脆弱性3个维度暴露度、敏感性和适应能力之间是否存在空间相关性, 进一步进行双变量空间自相关分析。由于暴露度在较大程度上取决于自然地理条件, 因此分别探讨34个县市暴露度与敏感性、适应能力的空间相关性。暴露度与敏感性空间相关性结果如图4b所示, Moran's I 指数为0.10, 通过0.05水平的显著性检验, 表明暴露度与敏感性空间上存在正相关关系, 系统对冰川变化影响的暴露度高(低)指数分布区与敏感性高(低)指数分布区相邻集聚分布。图4c显示暴露度与适应能力的空间相关性结果, Moran's I 指数为-0.13, 通过0.05水平的显著性检验, 表明暴露度与适应能力空间上存在显著的负相关关系, 天山地区对冰川变化影响的暴露度高(低)指数分布区与适应能力低(高)指数分布区相邻集聚分布。图4d显示敏感性与适应能力的空间相关性结果, Moran's I 指数为0.07且仅大于0, 表明敏感性与适应能力空间上存在微弱正相关关系, 一定程度上天山地区对冰川变化敏感性高(低)指数分布区与适应能力高(低)指数分布区相邻集聚分布。以上表明天山冰川变化具有高暴露、高敏感地区往往适应能力较低, 进而导致系统脆弱性较高, 而低暴露、低敏感地区则拥有较高的适应能力, 系统的脆弱性也相对较低。

5 冰川变化适应能力影响因素

5.1 变量选择

杨建平等通过空间主成分分析方法解释了中国冰川变化脆弱性的地理差异,坡向、海拔、地形遮蔽度和冰川面积变化率是导致冰川脆弱性的主要因素^[2]。基于对冰川变化的主要相关因素,以及案例区冰川变化脆弱性空间分布剖析中相关因子的研究,试图探索冰川变化脆弱性影响因素及其空间特征,但因暴露度较大程度上取决于自然地理条件,敏感性主要受制于气温和降水的变化,进而间接影响暴露度因素,两个维度之间具有一定的相互作用,同时暴露度维度较为稳定,敏感性维度年际变化波动较小,且两个维度受社会经济影响较小,在短期内不易发生较大改变。而短期内适应能力最易受政策、社会、经济等因素影响,因此,研究意在从人地关系中探讨自然、社会、经济、人口等要素对天山地区冰川变化适应能力影响的差异,选择适应能力指数作为被解释变量,以县市所在的地形地貌、经济发展水平、就业水平、社会生活质量、人口规模、社会服务为解释变量构建影响因素评价体系。解释变量分别为:海拔(X_1)、城镇固定资产投资额(X_2)、第二、三产业产值(X_3)、农林牧渔服务业总产值(X_4)、年末单位从业人员数(X_5)、地方财政收入(X_6)、农牧民人均纯收入(X_7)、城镇人口数(X_8)、邮政业务量(X_9)、中学以上在校人数(X_{10})、专业卫生技术人员(X_{11})。

5.2 影响因素解释力分析

以县市行政单元为研究尺度,利用GeoDetector软件对天山冰川变化适应能力的影响因素解释力进行定量分析,对比11个指标因素对适应能力空间分异及高低的相对重要性。因子探测表明(表3),天山地区适应能力高低及其空间分布差异主要受到社会经济因素影响,自然因素也起到一定的作用,各因素按 $P_{D,E}$ 统计量大小排序依次为:第二、三产业产值(0.86)>城镇人口数(0.79)>城镇固定资产投资额(0.63)>年末单位从业人员数(0.60)>邮政业务量(0.57)>专业卫生技术人员(0.56)>农牧民人均纯收入(0.53)>地方财政收入(0.37)>中学以上在校人数(0.36)>海拔(0.20)>农林牧渔服务业总产值(0.12)。

综合因子分析结果显示(表3):①第二、三产业产值对适应能力解释力最强, $P_{D,E}$ 统计量高达0.86,城镇人口数、城镇固定资产投资额与年末单位从业人员数的 $P_{D,E}$ 统计量均在0.6以上,说明这4个因素是影响天山地区适应能力的核心因素。第二、三产业产值和固定资产投资直接影响区域适应能力水平的提高,经济实力决定其在冰川变化带来的影响中采取何种措施与技术手段。城镇人口与从业人员直接影响地区经济发展规模、速度与结构,为此城镇化水平的高低及地区就业率在提高适应能力,减轻区域适应能力

表3 天山冰川变化适应能力影响因子探测结果

Tab. 3 Detection results of influencing factors on the adaptability of glacier change in Chinese Tianshan Mountains					
影响因子	$P_{D,E}$ 值	$P_{D,E}$ 值排序	影响因子	$P_{D,E}$ 值	$P_{D,E}$ 值排序
海拔	0.20	10	农牧民人均纯收入	0.53	7
城镇固定资产投资额	0.63	3	城镇人口数	0.79	2
第二、三产业产值	0.86	1	邮政业务量	0.57	5
农林牧渔服务业总产值	0.12	11	中学以上在校人数	0.36	9
年末单位从业人员数	0.60	4	专业卫生技术人员	0.56	6
地方财政收入	0.37	8			

差异等方面具有间接作用。② 邮政业务量、专业卫生技术人员、农牧民人均纯收入、地方财政收入与中学以上在校人数的 $P_{D,E}$ 统计量均在0.3以上,说明这五个因素是适应能力水平的二级因素。伴随着城镇化进程,地区社会服务质量及设备是否完善是其应对冰川变化影响的重要条件,社会服务质量好且设备齐全能较好减轻其负面影响;反之,其作用则会被削弱。受教育水平的高低及其普及程度对提高天山冰川变化适应能力政策、规定的执行具有显著影响,当地受教育水平高且普及率广,居民接受能力与包容度则高,在政策普及推广与实施过程中发挥积极作用;反之,居民接受能力低且不易理解相关政策内容,对于政策的实施则可能具有消极作用,进而不利于提高区域的适应能力。③ 海拔的 $P_{D,E}$ 统计量仅在0.2以上,说明自然地理因素是适应能力水平的三级因素。自然地理条件在提高适应能力方面具有一定影响,但不占据主导地位,社会经济水平起主导作用。④ 农林牧渔服务业总产值 $P_{D,E}$ 统计量仅大于0.1,说明农业经济是适应能力水平的四级因素。农林牧渔服务业的发展既受自然条件的制约,又受农业技术水平、机械能力高低的影响,因此农业经济在社会经济发展过程中具有一定作用,但对适应能力主要是间接影响。

基于因子分析可知,各影响因素对天山冰川变化适应能力的解释力具有一定的一致性与差异性,一致性表现在天山范围内,影响因子解释力 $P_{D,E}$ 统计量小于0.3的较少,只有4个,多数因子解释力在0.5~0.8之间,说明各因子在适应能力调整与提高过程中具有一定作用;差异性表现在影响因子解释力不同, $P_{D,E}$ 统计量最大的为0.86,最小的为0.12,说明各因子在适应能力调整与提高过程中所起到的作用不同,经济发展水平因素起主导作用,自然地理因素起辅助作用。

5.3 影响因素交互作用分析

交互探测主要探寻影响因素对适应能力的空间分异是否存在交互作用,识别不同影响因素之间相互作用是否增强或削弱对因变量的解释力。天山冰川变化适应能力空间分异的影响因素交互探测结果显示,各影响因素交互作用之后解释力明显增强,主要表现为双线性或非线性因子增强两种组合,因子间的双线性增强较为普遍,说明导致天山冰川变化适应能力空间分异现象不是由某一影响因素造成,而是不同影响因素之间共同相互作用的结果。

交互探测结果显示(表4):① 海拔、城镇固定资产投资额、农林牧渔服务业总产值、地方财政收入与其他因素交互作用呈现非线性增强。其中海拔与农林牧渔服务业总产值交互后解释力明显增强,增加率高达65.89%,与年末单位从业人员数交互后解释力增加幅度较小,为0.21%,说明自然地理位置与社会经济、就业水平、社会服务等因素交互后其解释力更趋明显,为此天山在应对冰川变化带来的影响时,应对措施采取或提高方面必须考虑自然因素的影响;② 农林牧渔服务业总产值与地方财政收入交互后解释力增加率为23.11%,说明农业经济是区域经济发展的一部分,其单独作用时对适应能力影响并不明显,但财政收入一定程度上是区域财政实力的表现,两者交互作用后对适应能力的解释增强;③ 地方财政收入与中学以上在校人数交互后解释力增加率为21.58%,说明中学以上受教育水平在单独作用时,解释力较弱,但在区域财政实力支持下,受教育水平与之交互作用后解释力呈增强趋势。④ 除上述因素外,其余因素交互作用呈现双线性增强,说明天山应对冰川变化的能力是各因子间相互作用的结果,其中海拔与第二、三产业产值交互后,解释力最大为0.97,原因在于天山海拔差异较大,而第二、三产业的发展不可避免受到海拔因素的影响;第二、三产业产值与中学以上在校人数交互作用明显,解释力为0.97,说明受教育水平的提高对第二、三产业的发展具有促进作

表 4 天山冰川变化适应能力影响因素交互探测结果
Tab. 4 Interaction detection results of influencing factors on the adaptability of glacier change
in Chinese Tianshan Mountains

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
X_2	0.86									
X_3	0.97	0.92								
X_4	0.54	0.76	0.95							
X_5	0.81	0.93	0.95	0.84						
X_6	0.61	0.83	0.87	0.60	0.92					
X_7	0.65	0.84	0.94	0.73	0.85	0.92				
X_8	0.94	0.88	0.95	0.89	0.91	0.88	0.91			
X_9	0.83	0.93	0.95	0.73	0.79	0.86	0.89	0.88		
X_{10}	0.67	0.94	0.97	0.47	0.85	0.89	0.76	0.89	0.87	
X_{11}	0.69	0.77	0.95	0.62	0.93	0.92	0.88	0.91	0.88	0.69

注： X_1 为海拔、 X_2 为城镇固定资产投资额、 X_3 为第二、三产业产值、 X_4 为农林牧渔服务业总产值、 X_5 为年末单位从业人员数、 X_6 为地方财政收入、 X_7 为农牧民人均纯收入、 X_8 为城镇人口数、 X_9 为邮政业务量、 X_{10} 为中学以上在校人数、 X_{11} 为专业卫生技术人员。

用，进而两者对其适应能力的解释力增强。基于交互分析可知，各影响因素之间存在明显的交互作用关系，且因子间交互后解释力明显增强，从而证明天山应对冰川变化的能力是自然、社会、经济和人口等要素相互作用的结果。

6 结论与讨论

6.1 结论

以中国天山为例，从暴露度、敏感性和适应能力构建了涵盖自然地理特征、人口状况、社会经济水平等因素的天山冰川变化脆弱性基本组织框架与评价指标体系，揭示了冰川变化脆弱性的空间相关特征，并基于地理探测器模型探讨了影响冰川变化适应能力的自然、社会、经济和人口因素，主要结论如下：

(1) 脆弱性等级由天山西部向东部地区降低，水平差异显著。天山东部地区处在低暴露、高敏感的系统环境，且拥有较好适应能力，在全区域范围内冰川变化的脆弱性最低；中部地区虽处于高暴露的系统环境，但敏感性较低，且拥有一定的适应能力，脆弱性较低；西部地区具有高暴露、高敏感的系统环境，同时拥有最低水平的适应能力，脆弱性较高。

(2) 天山冰川变脆弱性存在显著的空间正相关关系，暴露度与敏感性、适应能力分别在空间上存在明显正相关与负相关关系。表明区域范围内对冰川变化具有高暴露、高敏感地区往往适应能力较低，进而导致脆弱性较高；而低暴露、低敏感地区则拥有较高的适应能力，脆弱性也相较偏低。

(3) 天山应对冰川变化能力的空间异质性是自然、社会、经济、人口等因素相互共同作用的结果。其中，第二、三产业产值、城镇人口数、城镇固定资产投资额与年末单位从业人员数等经济因素具有主导作用，各影响因素之间交互作用后解释力显著增强，主要表现为双线性增强作用。

6.2 讨论

(1) 冰川面积变化与冰川变化脆弱性的关系。若认定冰川面积变化大则脆弱性高则具有一定的片面性, 冰川面积变化大是指冰川易受到外部环境的干扰, 暴露度高且较为敏感; 冰川变化脆弱性是由暴露度、敏感性、适应能力三个维度构成, 暴露度高不一定具有高脆弱性。如两次中国冰川编目数据显示阿合奇县冰川面积减少 544.48 km², 脆弱性指数为 0.66, 冰川面积变化与脆弱性具有一致性; 沙湾县冰川面积减少 317.32 km², 脆弱性指数为 0.07, 冰川面积变化与脆弱性一致性极差; 乌恰县冰川面积减少 41.92 km², 脆弱性指数为 0.36, 冰川面积变化与脆弱性一致性较差; 因此, 仅从冰川面积角度认定脆弱性高低具有一定偏差, 也要考虑到敏感性与适应能力方面。

(2) 评价指标的选取对冰川变化脆弱性综合评估的影响。由于影响冰川变化脆弱性因素较多且各因素间相互作用关系较为复杂, 不同研究尺度和类型对暴露度、敏感性和适应能力的理解以及相应指标参数、替代参数的选取差异明显。以暴露度为例, 市、州或县等空间单元上自然暴露度指标及替代性指标参数容易获取, 但空间尺度越大, 自然暴露度差异越明显。如研究冰川变化脆弱性, 区域间空间异质性明显比区域内更便于表达。社会经济暴露度指标则选取较难, 不同尺度空间单元社会经济发展水平、人口状况、城镇化速度等因素差异显著, 为此多选择空间单元共性指标评估其脆弱性程度。依据冰川变化脆弱性内涵, 系统内部结构与稳定性以及人类主体社会经济发展能力决定了施加在系统上的压力或胁迫能否打破系统支撑其基本状态和基本功能的阈值, 但如何通过敏感性和适应能力指标确切度量系统被损坏的临界阈值是当前冰川变化脆弱性研究的困难所在。

(3) 冰川未来变化脆弱性评估。本文以县市为基本单元, 着重探究特定冰川变化脆弱性空间相关特征和适应能力影响因素, 从而可以实现空间单元间冰川变化脆弱性差异性比较, 对针对性采取有效适应能力措施具有明确指导作用。但除冰川过去变化脆弱性评估外, 冰川未来变化脆弱性时空演变分析对于研究系统脆弱性动态演变过程及其驱动机制具有重要意义。然而由于大范围冰川数据资料获取难度较大且存在一定误差, 基于第一、二次中国冰川编目数据进行脆弱性特征及其影响因素研究仍停留在以往层面, 缺少对未来的变化预估。选取冰川数据资料相对完善的区域, 分析冰川未来变化脆弱性演变特征及其驱动机制, 并提出差异化的适应策略是需要深入研究的内容。

参考文献(References)

- [1] Li Kaiming, Li Zhongqin, Gao Wenyu, et al. Recent retreat of glaciers in the East Tianshan Mountains of Xinjiang and its impact on water resources. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(32): 2708-2716. [李开明, 李忠勤, 高闻宇, 等. 近期新疆东天山冰川退缩及其对水资源影响. *科学通报*, 2011, 56(32): 2708-2716.]
- [2] Yang Jianping, Li Man, Yang Suiqiao, et al. Vulnerability of the glaciers to climate change in China: Current situation and evaluation. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5): 1077-1087. [杨建平, 李曼, 杨岁桥, 等. 中国冰川脆弱性现状评价与未来预估. *冰川冻土*, 2013, 35(5): 1077-1087.]
- [3] Albinet M, Margat J. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bulletin BRGM 2nd Series*, 1970, 3(4): 13-22.
- [4] Ding Yongjian, Xiao Cunde. Challenges in the study of cryospheric changes and their impacts. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(10): 1067-1076. [丁永建, 效存德. 冰冻圈变化及其影响研究的主要科学问题概论. *地球科学进展*, 2013, 28(10): 1067-1076.]
- [5] Wang Shijin, Ding Yongjian, Xiao Cunde. Integrated impacts of cryosphere change on the economic and social system and its adaptive management strategies. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(5): 863-874. [王世金, 丁永建, 效存德. 冰冻圈变化对经济社会系统的综合影响及其适应性管理策略. *冰川冻土*, 2018, 40(5): 863-874.]

- [6] Yang J P, Ding Y J, Liu S Y, et al. Vulnerability of mountain glaciers in China to climate change. *Advances in Climate Change Research*, 2015, 6(3): 171-180.
- [7] Deng Maozhi. Vulnerability and adaptation of water resources system to glacier changes in typical basins of Xinjiang Uygur Autonomous Region [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012. [邓茂芝. 基于冰川变化的新疆典型流域水资源脆弱性及其适应研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.]
- [8] Yang Yuan. Assessment on glacier change vulnerability of social-ecological system in the Hexi inland river basin [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. [杨圆. 河西内陆河流域社会-生态系统对冰川变化的脆弱性[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.]
- [9] Yao Tandong, Qin Dahe, Shen Yongping, et al. Cryospheric changes and their impacts on regional water cycle and ecological conditions in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Nature*, 2013, 35(3): 179-186. [姚檀栋, 秦大河, 沈永平, 等. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响. *自然杂志*, 2013, 35(3): 179-186.]
- [10] He Y, Wu Y F, Liu Q F. Vulnerability assessment of areas affected by Chinese cryospheric changes in future climate change scenarios. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(36): 4784-4790.
- [11] Bhadwal S, Groot A, Balakrishnan S, et al. Adaptation to changing water resource availability in northern India with respect to Himalayan Glacier retreat and changing monsoons using participatory approaches. *Science of the Total Environment*, 2013, 468: S152-S161.
- [12] Grossi G, Caronna P, Ranzi R. Hydrologic vulnerability to climate change of the Mandrone glacier (Adamello-Presanella group, Italian Alps). *Advances in Water Resources*, 2013, 55: 190-203.
- [13] Pan H L. Evaluating the vulnerability of the water resources system of Yarkent River basin under the background of accelerating glacier melt in the future. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 379-385.
- [14] Thorsteinsson T, Johannesson T, Snorrason A. Glaciers and ice caps: Vulnerable water resources in a warming climate. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(6): 590-598.
- [15] Deng Haijun, Chen Yaning. The glacier and snow variations and their impact on water resources in mountain regions: A case study in Tianshan Mountains of central Asia. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1309-1323. [邓海军, 陈亚宁. 中亚天山山区冰雪变化及其对区域水资源的影响. *地理学报*, 2018, 73(7): 1309-1323.]
- [16] Tian H Z, Yang T B, Lv H, et al. Climate change and glacier area variations in China during the past half century. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(8): 1345-1357.
- [17] Li Zhongqin. Mass Balance and Dynamic Process Simulation of Mountain Glacier. Beijing: Science Press, 2019. [李忠勤. 山地冰川物质平衡和动力过程模拟. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [18] Xing Wucheng, Li Zhongqin, Zhang Hui, et al. Spatial-temporal variation of glacier resources in Chinese Tianshan Mountains since 1959. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(9): 1594-1605. [邢武成, 李忠勤, 张慧, 等. 1959年来中国天山冰川资源时空变化. *地理学报*, 2017, 72(9): 1594-1605.]
- [19] Zhao Gang, Yang Taibao, Tian Hongzhen. Response of glacier area variation to climate change in southern Tianshan mountains during 1990-2011. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(2): 257-263, 268. [赵刚, 杨太保, 田洪阵. 1990-2011年南天山地区冰川面积变化对气候的响应. *水土保持研究*, 2014, 21(2): 257-263, 268.]
- [20] Li Zhongqin, Wang Feiteng, Li Huilin, et al. Science and long-term monitoring of continental-type glaciers in arid region in China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(12): 1381-1390. [李忠勤, 王飞腾, 李慧林, 等. 长期冰川学观测引领大陆性和干旱区冰川变化与影响研究. *中国科学院院刊*, 2018, 33(12): 1381-1390.]
- [21] Wang Puyu, Li Zhongqin, Li Huilin, et al. Changes of ice-thickness and volume for representative glaciers in Tianshan mountains in the past 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 929-940. [王璞玉, 李忠勤, 李慧林, 等. 近50年来天山地区典型冰川厚度及储量变化. *地理学报*, 2012, 67(7): 929-940.]
- [22] Sun Meiping, Li Zhongqin, Yao Xiaojun, et al. Analysis on runoff variation of Glacier No.1 at the headwaters of the Urumqi River from 1959 to 2008. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(4): 650-660. [孙美平, 李忠勤, 姚晓军, 等. 1959—2008年乌鲁木齐河源1号冰川融水径流变化及其原因. *自然资源学报*, 2012, 27(4): 650-660.]
- [23] Jia Yufeng, Li Zhongqin, Jin Shuang, et al. Changes of the runoff and its components in Urumqi Glacier No.1 catchment, Tianshan Mountains, 1959-2017. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(6): 1302-1312. [贾玉峰, 李忠勤, 金爽, 等. 1959—2017年天山乌鲁木齐河源1号冰川流域径流及其组分变化. *冰川冻土*, 2019, 41(6): 1302-1312.]
- [24] Liu Zhu, Li Zhongqin. Factors affecting the variation of glacier surface runoff-coefficient in the recent years. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(1): 103-112. [刘铸, 李忠勤. 近期冰川表面径流系数变化的影响因素: 以天山乌鲁木齐河源1号冰川为例. *地球科学进展*, 2016, 31(1): 103-112.]

- [25] Xu M, Han H D, Kang S C, et al. Modeling glacier mass balance and runoff in the Koxkar River basin on the south slope of the Tianshan Mountains, China, from 1959 to 2009. *Water*, 2017, 9(2): 1-19.
- [26] Wang P Y, Li Z Q, Li H L, et al. Comparison of glaciological and geodetic mass balance at Urumqi Glacier No.1, Tianshan, Central Asia. *Global and Planetary Change*, 2014, 114(469): 14-22.
- [27] Zhang Hui, Li Zhongqin, Mou Jianxin, et al. Impact of the glacier change on water resources in the Kuytun River basin, Tianshan Mountains during recent 50 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(11): 1771-1777. [张慧, 李忠勤, 牟建新, 等. 近50年新疆天山奎屯河流域冰川变化及其对水资源的影响. *地理科学*, 2017, 37(11): 1771-1777.]
- [28] Cheng W M, Wang N, Zhao S M, et al. Growth of the Sayram Lake and retreat of its water-supplying glaciers in the Tianshan Mountains from 1972 to 2011. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(1): 13-22.
- [29] Hu Ruji. *Physical Geography of the Tianshan Mountains in China*. Beijing: China Environment Science Press, 2004: 1-14, 180-198. [胡汝骥. 中国天山自然地理. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 1-14, 180-198.]
- [30] Zhao Gang. The study of glacier changes in typical regions, China Tianshan Mountains [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014. [赵刚. 中国天山典型地区冰川变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.]
- [31] Li Li. Evaluation of glacier ecological regulation services value in the Tianshan Mountains, China [D]. Shihezi: Shihezi University, 2019. [李丽. 中国天山冰川生态调节服务价值评估[D]. 石河子: 石河子大学, 2019.]
- [32] Liu Chaohai, Ding Liangfu. A primary calculation of temperature and precipitation in Tianshan Mountains, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1988, 8(2): 151-159. [刘潮海, 丁良福. 中国天山冰川区气温和降水的初步估算. *冰川冻土*, 1988, 8(2): 151-159.]
- [33] Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 3-16. [刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状. *地理学报*, 2015, 70(1): 3-16.]
- [34] Shi Yafeng. *A Concise China Glacier Inventory*. Shanghai: Shanghai Science Popular Press, 2005. [施雅风. 简明中国冰川目录. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.]
- [35] Guo W Q, Liu S Y, Xu J L, et al. The second Chinese glacier inventory: Data, methods and results. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(226): 357-372.
- [36] Wang Qun, Yin Mahua, Yang Xingzhu, et al. Spatio-temporal evolution and impact mechanism of socio-ecological system vulnerability in poor mountainous tourist destinations: Taking Dabie Mountain Area as example. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(8): 1663-1679. [王群, 银马华, 杨兴柱, 等. 大别山贫困区旅游地社会—生态系统脆弱性时空演变与影响机理. *地理学报*, 2019, 74(8): 1663-1679.]
- [37] Yang Qingqing, Liu Qian, Yin Sha, et al. Vulnerability and influencing factors of rural transportation environment in Qinling-Daba mountainous areas: A case study of Luonan county in Shaanxi province. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(6): 1236-1251. [杨晴青, 刘倩, 尹莎, 等. 秦巴山区乡村交通环境脆弱性及影响因素: 以陕西省洛南县为例. *地理学报*, 2019, 74(6): 1236-1251.]
- [38] Anselin L, Kelejian H H. Testing for spatial error autocorrelation in the presence of endogenous regressors. *International Regional Science Review*, 1997, 20(1/2): 153-182.
- [39] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.]

Vulnerability of glacier change in Chinese Tianshan Mountains

CAI Xingran^{1,2}, LI Zhongqin¹, ZHANG Hui¹, XU Chunhai^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. National Cryosphere Desert Data Center, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Glacier is a crucial freshwater resource for populations and socio-economies in arid and semiarid regions, and the vulnerability of glacier change is an issue concerning regional ecological services and sustainable socio-economic development. We took Chinese Tianshan Mountains as an example and constructed a basic framework of the vulnerability of glacier change covering factors such as physical geography, population status, socio-economic level, agricultural development and social services based on exposure, sensitivity and adaptability, and constituted a targeted evaluation index system accordingly. We examined the spatial structure and spatial autocorrelation of the vulnerability on glacier change using ArcGIS and GeoDa softwares. We discussed the influence and interaction of natural conditions, socio-economy, population and other factors on glacier change adaptability using the GeoDetector model. Our results suggest that: (1) The vulnerability level decreased from west to east with significant differences. The eastern part of Chinese Tianshan Mountains has the lowest vulnerability, followed by the central part, and the western part has the highest value. (2) There is a significant positive correlation between exposure and sensitivity and a significant negative correlation between exposure and adaptability, indicating that the areas with high exposure and high sensitivity to glacier changes tend to have low adaptive capacity, which leads to higher vulnerability; on the contrary, the vulnerability is low. (3) The spatial heterogeneity of the ability to cope with glacier change in the Tianshan Mountains is the result of the combined effects of natural, social, economic and demographic factors. Among them, factors such as the production value of secondary and tertiary industries, urban population, urban fixed-asset investment and employees at the end of the year play a leading role.

Keywords: glacier change; vulnerability; adaptability; GeoDetector model; Chinese Tianshan Mountains