科学通报 2013 年 第 58 卷 第 9 期：833 ~ 839
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

未来气候变化情景下中国冰冻圈变化影响区域的脆弱性评价

何勇[①*]，武永峰[②]，刘秋峰[①]

① 国家气候中心，北京 100081；
② 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所，北京 100081
* 联系人，E-mail: heyong@cma.gov.cn

2012-07-25 收稿，2012-09-20 接受，2013-02-20 网络版发表
国家重点基础研究发展计划(2007CB411507)资助

摘要 基于 IPCC 的脆弱性定义，本文遴选了冰川覆盖率、冻土深度年变化率、积雪覆盖年变化率、地表径流年变化率、地温年变化率、植被生长年变化率以及人类发展指数年变化率 7 个指标，开展 2001~2020 年以及 2001~2050 年两个时段 A1(高排放)和 B1(低排放)情景下冰冻圈变化的脆弱性定量评价. 评价结果显示，未来中国冰冻圈变化影响区域的脆弱性自东向西呈逐渐增加的分布特征，中东部地区主要为微度和轻度脆弱区，强度脆弱区和极强度脆弱区主要分布在西藏的部分地区. 对 1981~2000 年、2001~2020 年以及 2001~2050 年的脆弱性比较表明，上述 3 个时期脆弱性最强的是 1981~2000 年，其次为 2001~2020 年，脆弱性最小的是 2001~2050 年. 从 1981~2000 年到 2001~2050 年，微度脆弱区面积逐渐增加，轻度脆弱区面积逐渐减小，强度脆弱区和极强度脆弱区则先增加再减小. 未来气候变化情景下冰冻圈变化影响区域脆弱性减小是由于暴露度、敏感性减小，适应性增加所致.

关键词
冰冻圈变化
脆弱性评价
暴露度
敏感性
适应性

作为地球气候系统的五大圈层之一，冰冻圈的变化对全球的自然以及人类社会产生着深远的影响. 随着全球气候变化研究的深入，冰冻圈的研究已经成为气候系统研究中最活跃的领域之一，也是当前全球变化和可持续发展研究领域的热点[1~8]. 中国是世界中低纬度地区冰冻圈最为发育的国家，冰冻圈的变化不仅对长江流域的旱涝[9]、西部干旱区的水资源短缺[10]、青藏高原的植被变化[11~13]等区域性的自然生态系统产生影响，也对海平面上升[14]等全球性的环境变化有着重要的作用. 在全球变暖背景下，20 世纪 90 年代以来中国约 82%的冰川处于退缩或消失状态，面积缩小比例为 2%~18%[15~17]；青藏高原多年冻土的退化迹象明显，高原季节冻结深度减薄最显著的地区在高原腹地和东北部，占其总冻结深度的 8%~10%[18]；青藏高原积雪呈现普遍增加的趋势，1957~1998 年雪深每年增加了 2.3%[3]. 随着全球变暖的持续，未来 50 年中国塔里木河流域源区冰川面积将减少 4%~6%[19]，青藏高原多年冻土面积将减少 8.8%~13.5%[20]，活动层厚度将从目前的 0.5~1.5 m 增加到 1.5~2.0 m[21]，青藏高原的积雪面积[22]以及新疆北部积雪深度[23]将呈现出减小的趋势. 未来冰冻圈的变化将持续对中国西部地区生态与环境安全以及水资源的可持续利用产生广泛而深远的影响.

IPCC 将脆弱性定义为某个系统容易受到但却无力应对气候变化各种不利影响的程度，随着气候变化的特征、幅度和速率而发生变化，并随该系统的暴露程度、敏感性及适应能力而改变[24]. 脆弱性评价就是为了预测和评估面对某种或者多种暴露时系统的

引用格式：何勇，武永峰，刘秋峰. 未来气候变化情景下中国冰冻圈变化影响区域的脆弱性评价. 科学通报，2013, 58: 833–839
英文版见：He Y, Wu Y F, Liu Q F. Vulnerability assessment of areas affected by Chinese cryospheric changes in future climate change scenarios. Chin Sci Bull, 2012, 57: 4784–4790, doi: 10.1007/s11434-012-5525-0

响应及其自身维持稳定所需的抵抗力和恢复能力, 并探求能动的干预策略, 防止系统进一步退化或脆弱化. 冰冻圈变化的脆弱性指的是自然和社会系统因受冰冻圈变化(冰川、冻土以及积雪的变化)而导致的脆弱性, 这些系统包括冰冻圈变化影响区域内的干旱区绿洲系统、寒区生态系统以及人类社会等系统, 冰冻圈变化的脆弱性是上述系统对冰冻圈变化的暴露度、敏感性以及适应能力的函数. 冰冻圈变化的脆弱性评价是对冰冻圈变化引起的自然和人类系统已经产生以及未来可能产生的脆弱性开展的评价. 目前, 冰冻圈变化的脆弱性评价刚起步, 评价方法和指标体系不成熟, 很多研究还处于探索阶段[25~27]. 本文将基于IPCC的脆弱性定义, 开展未来50年中国冰冻圈变化的脆弱性定量评价, 分析冰冻圈变化对其影响区域内的自然和社会系统的作用程度, 为制定区域内的生态环境保护和适应气候变化战略提供科学依据.

1 研究区域、方法和数据

1.1 研究区域

中国冰冻圈变化的影响区域(课题研究成果, 未发表)包括了西北、华北、东北、西南中西部以及华东部分地区的 21 个省(市、区)1173 个县, 总面积 749.4×10^4 km^2 (如图 1, 2).

1.2 评价方法和指标

(ⅰ) 评价方法. 基于 IPCC 对脆弱性的定义[24], 本研究将脆弱性的计算方法定义如式(1),

$$F=\frac{\left(\sum_{i=0}^{l}W_{ei}\times E_i\right)\times\left(\sum_{i=0}^{m}W_{si}\times S_i\right)}{\sum_{i=0}^{n}W_{ai}\times A_i}, \qquad (1)$$

其中 F 为脆弱性指数, i 指各类指标序数, l 指暴露度指标个数, m 指敏感性指标个数, n 指适应性指标个数, W_{ei} 指第 i 个暴露度指标的权重, W_{si} 指第 i 个敏感性指标的权重, W_{ai} 指第 i 个适应性指标的权重, E_i 指第 i 个暴露性指标, S_i 指第 i 个敏感性指标, A_i 指第 i 个适应性指标.

(ⅱ) 研究时段. 参照中国分阶段的未来发展目标, 本研究选取 2001~2020 年(以下简称 2020s)以及 2001~2050 年(以下简称 2050s)这两个时段, 基于IPCC的 A1(高排放)和 B1(低排放)情景, 开展中国冰冻圈变化的脆弱性评价. 本文还选取了 1981~2000 年(以下简称 2000s)中国冰冻圈变化的脆弱性评价结果, 与未来 2 个时段的脆弱性特征进行比较分析.

(ⅲ) 指标构建. 本研究从冰冻圈变化的暴露度、敏感性和适应性 3 个方面构建了 7 个脆弱性评价指标, 其中暴露度包括了冰川覆盖率、冻土深度年变化率、积雪覆盖年变化率 3 个指标; 敏感性包括了地表径流年变化率、地温年变化率两个指标; 适应性包括了植被生长年变化率、人类发展指数[28]年变化率 2 个指标(表 1), 以冰冻圈变化影响区域内的县域为基本的计算单元.

(ⅳ) 指标权重判定. 本文运用层次分析法确定指标的权重值[29]. 权重值确定的关键就是判断矩阵的构建, 即确定各个指标的相对重要性. 根据冰冻圈研究领域多名专家对上述 7 个指标的重要性进行评判打分, 按照各层因素指标相对应上一层准则层影响程度大小建立判断矩阵, 计算判断矩阵的特征向量以获得权重向量; 通过计算随机一致性比率 CR (当 CR<0.10 时, 层次分析排序的结果有满意的一致性, 即权重向量的分配是合理的)来判断层次分析排序的结果. 经计算, 本研究所有判断矩阵都通过一致性检验, 即 CR<0.10, 具有满意的一致性. 最后将各层次的指标权重进行综合排序计算, 得到 7 个指标数据层的权重(如表 2). 将上述 7 个指标的初始数据进行标准化处理, 标准化后的指标值介于 0~1 之间.

(ⅴ) 气候要素数据来源. CCSM3.0 是由美国国家大气研究中心(NCAR)开发的一个大气、海洋、陆地和海冰完全耦合的模式[30], 根据对 IPCC AR4 模式对东亚地区气候模拟能力的分析表明, CCSM3.0 对东亚地区气候模拟的评估能力为中等水平[31], 结合其较高的水平分辨率, 本研究选取了该模式参与 IPCC AR4 中的 A1 和 B1 情景下 2001~2050 年的模拟结果, 包括月平均气温、月平均地温、月降水量、月

表 1 中国冰冻圈变化的脆弱性评价指标层次体系

目标层	准则层	指标层 1	指标层 2
冰冻圈变化的脆弱性评价	暴露度	冰冻圈变化暴露	冰川覆盖率
			冻土深度年变化率
			积雪覆盖年变化率
	敏感性	冰冻圈变化敏感	地表径流年变化率
			地温年变化率
	适应性	冰冻圈变化适应	植被生长年变化率
			人类发展指数年变化率

表 2 中国冰冻圈变化的脆弱性评价指标权重排序 a)

	暴露性	敏感性	适应性	层次总排序结果
冰川覆盖率	0.1667			0.05556
冻土深度年变化率	0.3333			0.11109
积雪覆盖年变化率	0.5			0.16665
地表径流年变化率		0.75		0.24998
地温年变化率		0.25		0.08333
植被生长年变化率			0.3333	0.11109
人类发展指数年变化率			0.6667	0.22221

a) 暴露性、敏感性、适应性的权重值均为 0.33

平均地表径流、月平均云面积百分比、月平均地表积雪面积百分比, 作为脆弱性评价指标的基础计算数据.

(vi) 指标的计算方法. 利用中国第一次冰川编目的冰川分布资料计算研究区域内各个县域单元的冰川覆盖率, 参考施雅风等人[32]的研究成果, 得到 2020 和 2050 年中国海洋型冰川、亚大陆型冰川及极大陆型冰川的缩小比例, 获得 2020s 和 2050s 研究区域内各县域单元冰川覆盖率. 基于 CCSM3.0 模式在 A1 和 B1 情景下的月平均气温和月平均降水量, 利用改进的 Kudryavtsev 冻土计算方法[33], 分别模拟 A1 和 B1 情景下的研究区域内 2001~2050 年冻土深度, 计算获得研究区域内各县域单元 2020s 和 2050s 冻土深度的年变化率. 利用 CCSM3.0 基于 A1 和 B1 情景下模拟的 2001~2050 年月平均地表积雪面积百分比, 计算获得研究区域内各县域单元的 2020s 以及 2050s 的积雪覆盖年变化率. 利用 CCSM3.0 基于 A1 和 B1 情景下模拟的 2001~2050 年月平均地表径流, 计算获得研究区域内各县域单元的 2020s 以及 2050s 的地表径流年变化率. 利用 CCSM3.0 基于 A1 和 B1 情景下模拟的 2001~2050 年月平均地温, 计算获得研究区域内各县域单元的 2020s 以及 2050s 的地温年变化率. 利用 CCSM3.0 基于 A1 和 B1 情景下的月平均气温、降水量以及月平均云面积百分比, 驱动 BIOME4 模型[34], 模拟 2001~2050 年两个同气候情景下中国陆地植被的叶面积指数(LAI), 计算获得研究区域内各县域单元的 2020s 以及 2050s 的 LAI 的年变化率, 作为植被生长的年变化率. 受资料来源限制, 人类发展指数年变化率以省域为基本计算单元, 省域内各县域取相同的人类发展指数年变化率. 参照 2020 年中国经济、健康[35]、以及教育发展目标(《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010~2020 年)》), 计算得出到 2020 年中国人类发展指数为 0.84, 并假设全国各省 2020 年的 HDI 值为 0.84, 以 1999 年中国各省 HDI 值[36]为基准值, 计算 2020s 各省 HDI 的年变化率. 参照 2000 年世界各国人类发展指数排名中发达国家的 HDI 值(在 0.9~0.94 之间)[37], 选取中间值 0.92 作为 A1 和 B1 情景下 2050 年中国 HDI 值, 并假设全国各省 2050 年的 HDI 值都为 0.92. 以 1999 年中国各省 HDI 为基准值, 计算 2050s 各省 HDI 年变化率.

从 2020s 和 2050s 在 A1 和 B1 情景下 7 个指标区域平均值的计算结果来看, 未来情景下中国冰冻圈的冰川覆盖变化比例、冻土深度年变化率以及积雪覆盖年变化率大都为负, 表明未来冰川面积、积雪覆盖以及冻土深度为减少趋势(A1 情景下的 2020s 的积雪覆盖除外); 地表径流和地温的年变率大都为正, 表明未来地表径流和地温为增加的趋势(B1 情景下 2020s 地表径流除外); 对于植被生长年变化率, 在 A1 情景下为正, 表明在 A1 情景下未来植被长势变好, B1 情景下为负, 表明在 B1 情景下未来植被的长势变差; 人类发展指数年变化率在两个情景下都为正, 显示了未来人类的适应能力不断增强(表 3).

2 分析与讨论

本研究分别计算了 2020s 以及 2050s 两个时段中国冰冻圈变化导致其影响区域的脆弱性指数. 采用聚类分析法, 对 2000s, 2020s 以及 2050s 三个时段脆弱性指数进行了聚类分析, 划分出 5 个聚类, 计算出 0.22, 0.36, 0.56 和 0.77 四个聚类阈值. 根据这些阈值, 将冰

表 3 冰冻圈变化评价指标的区域平均值

情景	时间段	冰川覆盖变化比例[32](%)	冻土深度年变化率(m/a)	积雪覆盖年变化率(%)	地表径流年变化率(kg/(m^{2}a))	地温年变化率(℃/a)	植被生长年变化率	人类发展指数年变化率
A1	2020s	−6~−14	−0.00326	0.07584	0.001448	0.02816	0.5725	0.006757
	2050s	−6~−14	−0.00815	−0.04268	0.0001446	0.01599	0.04749	0.00448
B1	2020s	−13~−43	−0.00877	−0.05865	−0.000405	0.01936	−0.00294	0.006757
	2050s	−13~−43	−0.0081	−0.01646	0.0000099	0.006595	−0.0583	0.00448

冻圈变化的脆弱性划分为 5 个等级, 即微度脆弱区(脆弱性指数小于 0.22)、轻度脆弱区(脆弱性指数 0.22~0.36)、中度脆弱区(脆弱性指数 0.36~0.56)、强度脆弱区(脆弱性指数 0.56~0.77)和极强度脆弱区(脆弱性指数大于 0.77). 以下将分别讨论不同时期、不同情景下的冰冻圈变化的脆弱性特征.

2.1 2020s 冰冻圈变化的脆弱性分析

在 A1 情景下, 研究区域内冰冻圈变化的脆弱性指数分布范围在 0.0852~0.4762 之间, 区域平均值为 0.1832. 其中东北、华北、西北大部地区以及四川南部、云南、贵州部分地区的脆弱性都较小, 脆弱性指数大都小于 0.22, 为微度脆弱区; 青海大部地区、甘肃东南部、四川北部等地的脆弱性指数介于 0.22~0.36 之间, 为轻度脆弱区; 西藏大部地区的脆弱性指数都大于 0.36, 其中西藏中部的脆弱性指数在 0.36~0.56 之间, 为中度脆弱区, 南部地区的脆弱性指数在 0.56~0.77 之间, 为强度脆弱区, 在西藏的西部以及西北部部分地区的脆弱性指数大于 0.77, 为极强度脆弱区. 在 B1 情景下, 研究区域内冰冻圈变化的脆弱性指数分布范围在 0.0815~0.6128 之间, 区域平均值为 0.1834, 与 A1 情景下的平均值非常接近. B1 情景下的脆弱性的分布特征与 A1 类似, 也是呈现自东向西逐渐增大的趋势, 只是在西藏地区, 强度脆弱区和极强度脆弱区的分布范围比 A1 情景下要大, 强度脆弱区分布在中东部地区, 而极强度分布于中南部和西北部的部分地区(见图 1).

与 2000s 的各级脆弱区的分布面积相比(表 4), 在 A1 及 B1 情景下, 2020s 微度脆弱区的面积分别为 539.87×10^4 和 541.83×10^4 km^2, 大于 2000s 的 184.07×10^4 km^2; 轻度脆弱区和中度脆弱区的面积分别为 120.51×10^4, 98.75×10^4 和 45.88×10^4, 15.12×10^4 km^2, 小于 2000s 的面积; 而强度脆弱区和极强度脆弱区的面积分别为 28.29×10^4, 52.85×10^4 和 14.86×10^4,

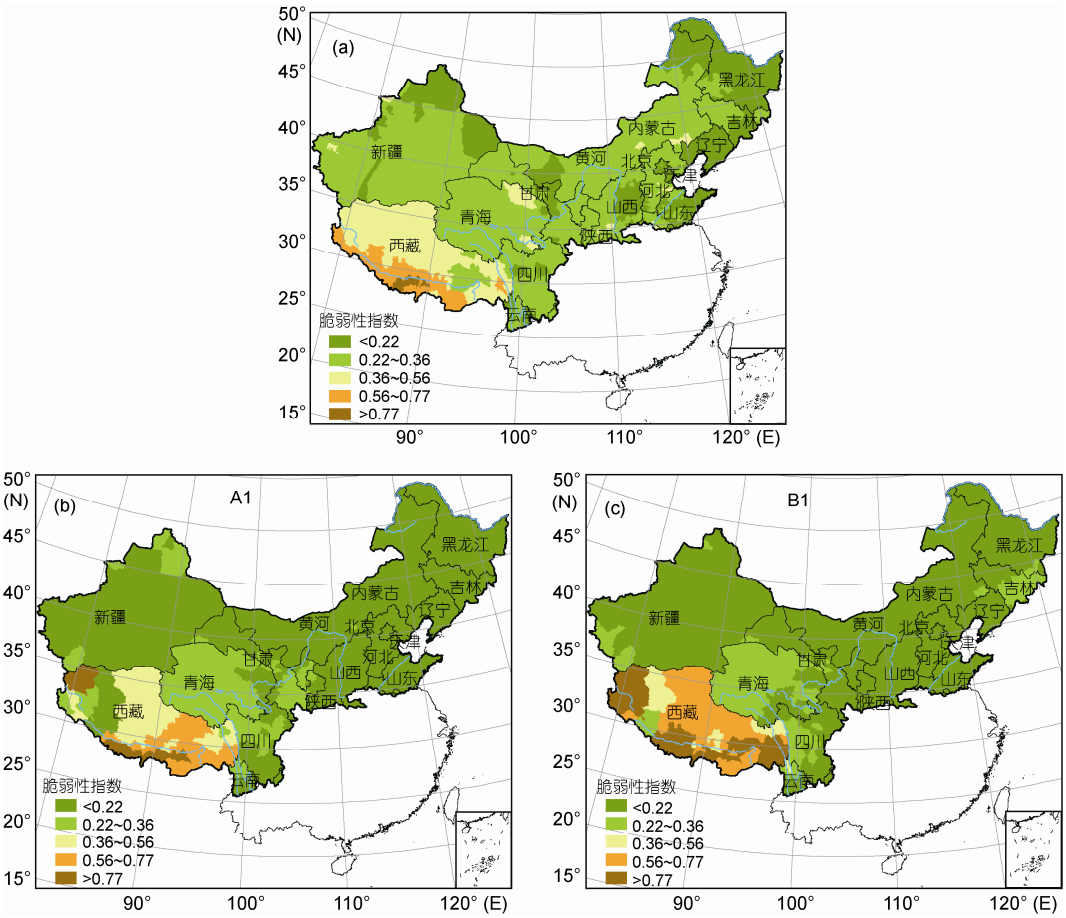

图 1 2000s(a)以及 2020s((b), (c))不同情景下中国冰冻圈变化的脆弱性分布特征

表 4　不同情景下中国冰冻圈变化脆弱性指数的区域面积(单位: 10^4 km^2)

情景	时间	微度脆弱区(<0.22)	轻度脆弱区 (0.22~0.36)	中度脆弱区 (0.36~0.56)	强度脆弱区 (0.56~0.77)	极强度脆弱区 (>0.77)
A1	2000s	184.07	452.14	87.07	23.17	2.94
	2020s	539.87	120.51	45.88	28.29	14.86
	2050s	642.14	48.26	47.193	11.82	0.00
B1	2020s	541.83	98.75	15.12	52.85	40.85
	2050s	640.07	35.75	43.74	11.60	18.23

40.85×10^4 km^2, 大于 2000s 的对应面积. 从各级脆弱区面积分布来看, 与 2000s 相比, A1 和 B1 情景下 2020s 的脆弱性分布呈两侧增加, 中间减小的特征, 即 2020s 的微度脆弱区和强度脆弱区、极强度脆弱区的面积大于 2000s, 而轻度脆弱区和中度脆弱区的面积小于 2000s.

2.2　2050s 冰冻圈变化的脆弱性分析

在 A1 情景下, 冰冻圈变化的脆弱性指数分布范围为 0.0346~0.3290, 平均值为 0.1048; 在 B1 情景下, 冰冻圈变化的脆弱性指数分布范围在 0.0323~0.4138, 平均值为 0.0917. 与 2020s 冰冻圈变化的脆弱性分布特征类似, A1 和 B1 情景下中国冰冻圈变化的脆弱性呈现出自东向西逐渐增大的趋势, 除了西藏之外, 研究区域大部分地区的脆弱性指数都小于 0.22, 为微度脆弱区. 在 A1 情景下, 极强度脆弱区消失, 强度脆弱区分布在西藏的西北部的部分地区; 在 B1 情景下, 强度脆弱区分布在西藏的中西部的部分地区, 极强度脆弱区分布在西藏的西北部的部分地区(图 2).

与 2020s 相比(表 4), 在 A1 和 B1 情景下, 2050s 的微度脆弱区面积分别为 642.14×10^4 和 640.07×10^4 km^2, 大于 2020s 的值; 轻度脆弱区的面积分别为 48.26×10^4 和 35.75×10^4 km^2, 小于 2020s 的值, 而强度脆弱区的面积为 11.82×10^4 和 11.60×10^4 km^2, 小于 2020s 的值, 极强度脆弱区的值为 0 和 18.23×10^4 km^2, 也小于 2020s 的值. 因此, 与 2020s 相比, 2050s 脆弱性小的区域(微度和轻度脆弱区)面积增加, 脆弱性大的区域(强度和极强度脆弱区)面积减小, 变化特征与 2020s 与 2000s 的比较结果不尽相同.

对比 3 个时期的中国冰冻圈变化引起的影响区域的脆弱性大小, 脆弱性最强的时期是 2000s(平均值为 0.2644), 其次为 2020s 时期, 在 A1 和 B1 情景下的区域平均脆弱性值分别为 0.1832 和 0.1834; 脆弱性最小的时期是 2050s, A1 和 B1 情景下的脆弱性值分别为 0.1048 和 0.0917. 从 2000s 到 2020s 再到 2050s 三个时期, 微度脆弱区面积呈现逐渐增加的趋

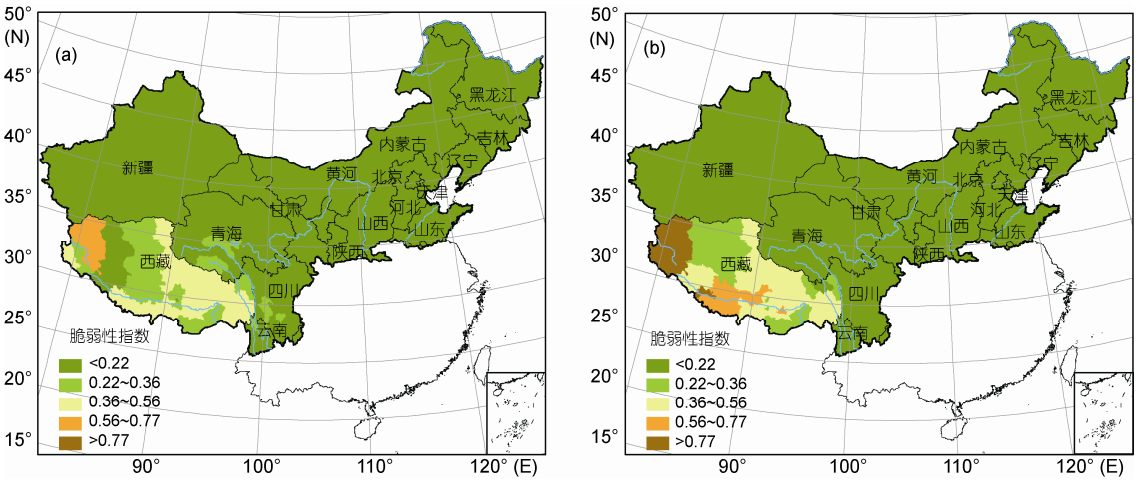

图 2　2050s A_1(a)和 B_1(b)不同情景下中国冰冻圈变化的脆弱性分布特征

表 5 不同时期冰冻圈脆弱性评价结果

时段	暴露度		敏感性		适应性		脆弱性	
2000s	0.4767		0.6952		0.1499		0.2644	
	A1	B1	A1	B1	A1	B1	A1	B1
2020s	0.4640	0.4715	0.5247	0.5016	0.1663	0.1663	0.1832	0.1834
2050s	0.2517	0.2492	0.5897	0.4476	0.1736	0.1736	0.1048	0.0917

势, 轻度脆弱区面积表现为逐渐减小的趋势, 中度脆弱区面积呈现先减小后增加的特征, 而强度脆弱区和极强度脆弱区则表现出先增加再减小的特征(表 4). 不同脆弱区面积的变化差异反映了中国冰冻圈变化所引起的脆弱性的复杂性.

2.3 脆弱性变化的成因分析

为进一步讨论不同时期和情景下中国冰冻圈变化脆弱性差异的原因, 本研究对各个时期的暴露度、敏感性、适应性开展分析. 分析结果表明(表 5), 在 A1 和 B1 情景下, 2020s 和 2050s 的暴露度和敏感性都小于 2000s 的值, 而适应性大于 2000s 的值, 根据式(1), 暴露度和敏感性减小而适应性增大, 其脆弱性必然减小. 因此, 2000s 的脆弱性指数(0.2644)大于 A1 情景下 2020s 的 0.1832 和 2050s 的 0.1048, 以及 B1 情景下 2020s 的 0.1834 和 2050s 的 0.0917, 也即过去 20 年中国冰冻圈变化导致的脆弱性大于未来 2020s 以及 2050s 两个时期.

对未来两个时期的暴露度、敏感性和适应性的分析表明, 在 A1 情景下, 2020s 的暴露度大于 2050s 值, 而 2020s 的敏感性小于 2050s 值, 2020s 的适应性小于 2050s 值, 通过脆弱性计算结果显示, 2020s 的脆弱性指数为 0.1832, 大于 2050s 的值(0.1048). 在 B1 情景下, 2020s 的暴露度、敏感性大于 2050s 的值, 而适应性小于 2050s 的值, 因此, 2020s 的脆弱性指数(0.1834)大于 2050s 脆弱性的值(0.0917). 对不同时段以及不同情景下冰冻圈变化的脆弱性分析显示, 从 2000s 向 2020s 及 2050s, 冰冻圈影响区域的暴露度、敏感性大都减小, 而适应性增加, 其脆弱性也在逐渐减小.

3 小结

本文利用 IPCC 的脆弱性定义, 定量分析了冰冻圈变化对其影响区域内的脆弱性特征. 研究的结果显示, 研究区域内 2000s, 2020s 和 2050s 的脆弱性逐步减小, 脆弱性减小的主要原因是由于系统暴露度和敏感性减小, 以及适应性增加所致. 本文中由于采用了各种自然科学和社会科学的研究和统计数据, 这些数据的不一致性可能对研究结论产生一定影响, 导致结论的不确定性增大. 因此, 将来可以通过选取更高分辨率的模式模拟结果、多模式集成数据[38~40]以及更完善的社会统计资料以提高冰冻圈变化脆弱性评价的准确性. 本文在冰冻圈变化的脆弱性方面开展了初步的探索, 可以为未来进一步开展相关研究工作提供技术和方法的借鉴, 同时, 研究结论对制定冰冻圈变化影响区域内的社会经济发展战略以及适应气候变化也有一定的参考价值.

参考文献

1 IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 339–378

2 秦大河, 丁永健. 冰冻圈变化及其影响研究——现状、趋势及关键问题. 气候变化研究进展, 2009, 5: 187–195

3 Qin D, Liu S Y, Liu P. Snow cover distribution, variability, and response to climate change in western China. Clim Change, 2006, 19: 1820–1833

4 姚檀栋, 李治国, 杨威, 等. 雅鲁藏布江流域冰川分布和物质平衡特征及其对湖泊的影响. 科学通报, 2010, 55: 1750–1756

5 Yang M X, Shiklomanov N, Nelson F, et al. Permafrost degradation and its environmental effects on the Tibetan Plateau: A review of recent research. Earth-Sci Rev, 2010, 103: 31–44

6 Guo D L, Wang H J. The significant climate warming in the northern Tibetan Plateau and its possible causes. Int J Climatol, 2011, 32: 1775–1781

7 马丽娟, 罗勇, 秦大河. CMIP3 模式对未来 50 a 欧亚大陆雪水当量的预估. 冰川冻土, 2011, 33: 707–720

8 Shi Y, Gao X, Wu J, et al. Changes in snow cover over China in the 21st century as simulated by a high resolution regional climate model. Environ Res Lett, 2011, 6: 1–8
9 张顺利, 陶诗言. 青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及数值研究. 大气科学, 2001, 25: 372–390
10 刘时银, 丁永建, 张勇, 等. 塔里木河流域冰川变化及其对水资源影响. 地理学报, 2006, 61: 482–490
11 王绍令, 林清, 赵林. 青康公路国道线沿线的多年冻土. 干旱区地理, 1999, 22: 42–49
12 袁九毅, 闫水玉, 赵秀锋, 等. 唐古拉山南麓多年冻土退化与嵩草草甸变化的关系. 冰川冻土, 1997, 19: 47–51
13 王根绪, 李元首, 吴青柏, 等. 青藏高原冻土区冻土与植被关系及其对高寒生态系统的影响. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36: 743–754
14 任贾文, 叶柏生, 丁永建, 等. 中国冰冻圈变化对海平面上升潜在贡献的初步估计. 科学通报, 2011, 56: 1084–1087
15 Liu S Y, Sun W X, ShenY P, et al. Glacier changes since the Little Ice Age maximum in the western Qilian Shan, Northwest China, and consequences of glacier runoff for water supply. J Glaciol, 2003, 49: 117–124
16 姚檀栋, 王友清, 刘时银, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34: 535–543
17 Ding Y J, Liu S Y, Li J, et al. The retreat of glaciers in response to recent climate warming in western China. Ann Glaciol, 2006, 43: 97–105
18 Zhao L, Ping C L, Yang D Q, et al. Changes of climate and seasonally frozen ground over the past 30 years in Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau, China. Glob Planet Change, 2004, 43: 19–31
19 王欣, 谢自楚, 刘时银, 等. 塔里木河源区冰川系统变化趋势预测. 山地学报, 2006, 24: 641–646
20 南卓铜, 李述训, 程国栋. 未来 50 与 100 a 青藏高原多年冻土变化情景预测. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34: 528–534
21 Guo D L, Wang H J. A projection of permafrost degradation on the Tibetan Plateau during the 21st century. J Geophys Res, 2012, 117: D05106, doi: 10.1029/2011JD016545
22 汪方, 丁一汇. 不同排放情景下模拟的 21 世纪东亚积雪面积变化趋势. 高原气象, 2011, 30: 869–877
23 王澄海, 王芝兰, 沈永平. 新疆北部地区积雪深度变化特征及未来 50 a 的预估. 冰川冻土, 2010, 32: 1059–1065
24 IPCC. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 89–91
25 方一平, 秦大河, 丁永建. 浅析江河源区生态系统脆弱性研究的科学问题. 山地学报, 2009, 27: 140–148
26 杨建平, 张廷军. 我国冰冻圈及其变化的脆弱性与评估方法. 冰川冻土, 2010, 32: 1084–1092
27 邓茂芝, 刘寿东, 张洪广, 等. 干旱区内陆河流域不同特征居民对气候变化及冰冻圈变化的感知差异分析. 冰川冻土, 2011, 33: 1074–1080
28 UNDP. Human Development Report 1990. New York: Oxford University Press, 1990. 9–16
29 Saaty T L. The Analytical Hierarchy Process. New York: McGraw-Hill Inc, 1980
30 Collins W D, Bitz C M, Blackmon M L. The community climate system model version 3 (CCSM3). J Clim, 2006, 19: 2122–2143
31 许崇海, 沈新勇, 徐影. IPCC AR4 多模式对东亚地区气候模拟能力的分析. 气候变化研究进展, 2007, 3: 287–292
32 施稚风, 刘时银. 中国冰川对 21 世纪全球变暖响应的预估. 科学通报, 2000, 45: 434–438
33 王澄海, 靳双龙, 吴忠元, 等. 估算冻结(融化)深度方法的比较及在中国地区的修正和应用. 地球科学进展, 2009, 24: 132–140
34 Kaplan J O, Bigelow N H, Prentice I C, et al. Climate change and Arctic ecosystems: 2. Modeling, paleodata-model comparisons, and future projections. J Geophys Res, 2003, 108: 8171, doi: 10.1029/2002JD002559
35 陈竺. 健康中国 2020 战略思路与框架. 中国在行动——糖尿病国际论坛, 2009
36 Stockholm Environment Institute. China Human Development Report 2002: Making Green Development A Choice. New York: Oxford University Press, 2002. A3
37 UNDP. Human Development Report 2002—Deepening Democracy in A Fragmented World. New York: Oxford University Press, 2002. 149
38 高学杰, 石英, Giorgi F. 中国区域气候变化的一个高分辨率数值模拟. 中国科学: 地球科学, 2010, 40: 911–922
39 高学杰, 石英, 张冬峰, 等. RegCM3 对 21 世纪中国区域气候变化的高分辨率模拟. 科学通报, 2012, 57: 374–381
40 Liu J W, Li B, Zhou T J, et al. The extreme summer precipitation over east China during 1982–2007 simulated by the LASG/IAP regional climate model. Atmos Oceanic Sci Lett, 2012, 5: 62–67