

文章编号: 1000-0240(2012)02-0485-09

# 生态-经济系统对冰冻圈变化的适应能力评价 ——以玉龙雪山地区为例

杨岁桥<sup>1</sup>, 杨建平<sup>1, 2</sup>, 王世金<sup>2</sup>, 谭春萍<sup>1</sup>, 刘俊峰<sup>1, 3</sup>

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 黑河上游生态-水文试验研究站, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 以玉龙雪山地区为例, 基于关联性、全面性与合理性、可操作性原则, 结合玉龙雪山地区冰冻圈变化的特点与主要影响, 从生态、水资源、经济与社会系统 4 个方面遴选了 20 个指标, 构建了生态-经济系统对冰冻圈变化的适应能力评价体系, 运用层次分析法和多目标线性加权函数法建立了冰冻圈变化适应能力指数模型, 对玉龙雪山地区冰冻圈变化适应能力进行了综合评价. 结果表明: 就子系统而言, 1980—2008 年除水资源系统的适应能力呈下降态势外, 生态、经济与社会系统对冰冻圈变化的适应能力均呈上升趋势. 水资源总量减少是水资源系统适应能力降低的主要影响因素. 玉龙雪山地区冰冻圈变化的综合适应能力增强, 经济系统对综合适应能力的贡献达到 37%, 居首位, 其次为社会系统, 为 29%. 旅游业发展驱动下的生态环境保护, 地区经济实力增强, 交通设施建设, 居民收入增加共同助推了该地区综合适应能力的提升.

**关键词:** 生态-经济系统; 冰冻圈变化; 适应能力; 适应能力指数; 玉龙雪山

**中图分类号:** F062.2 **文献标识码:** A

## 0 引言

冰冻圈是地球表面水以固态形式存在的圈层, 包括所有种类的冰、雪和冻结土<sup>[1]</sup>. 我国是中、低纬度地区冰冻圈最发育的国家, 冰川面积达 59 425 km<sup>2</sup><sup>[2]</sup>, 占全球中、低纬度冰川面积的 50% 以上; 多年冻土区面积 215 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup><sup>[3]</sup>; 稳定季节积雪区(积雪日数超过 60 d)面积 420 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup><sup>[4]</sup>. 冰川冰储量 5 600 km<sup>3</sup>, 折合水量约为 50 000 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 相当于 5 条长江年径流量以固态形式存储于西部高山<sup>[5]</sup>. 多年冻土地下冰储量达 9 528 km<sup>3</sup><sup>[6]</sup>. 全球气候变暖, 我国冰冻圈明显萎缩, 且自 20 世纪 90 年代以来呈加快萎缩趋势<sup>[4, 7-12]</sup>. 冰冻圈变化不仅已对或正对西部水资源持续利用、寒旱区生态和环境安全、西部社会经济可持续发展产生广泛和深刻的影响, 而且随着雪冰灾害范围南扩与发生频率增

加, 亦对我国南方地区社会经济发展产生严重的负面影响.

作为气候系统的五大圈层之一, 冰冻圈因其对气候的高度敏感性和重要的反馈作用而倍受关注, 且因其变化对沿海低地、海岛小国的安全, 以及高亚洲及其周边地区的供水、粮食生产、生态安全构成威胁<sup>[13-16]</sup>. 因此, 冰冻圈变化及其影响不仅是世界的研究热点, 而且受到国际社会和政界的极大关注. 如何适应冰冻圈变化对人类发展带来的风险成为国际社会的一致目标. 然而, 目前国际上针对冰冻圈变化及其影响的适应研究几乎处于空白. 由于冰冻圈水文、生态效应、灾害在我国日趋突显, 而且在新一轮西部大发展中, 冰冻圈变化, 尤其是冰川的变化成为决定成败的关键, 适应冰冻圈变化的影响成为国家和地区社会经济可持续发展中的现实和战略问题<sup>[17-18]</sup>. 近年来, 冰冻圈及其变化的脆弱

收稿日期: 2011-09-15; 修订日期: 2011-12-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB411507); 科技部科技基础性工作专项(2006FY110200); 冰冻圈科学国家重点实验室自主研究课题(SKLCSS-ZZ-2008-04)资助

作者简介: 杨岁桥(1986—), 女, 陕西咸阳人, 2009 年毕业于云南大学, 现为在读硕士研究生, 主要从事 GIS 应用研究.

E-mail: yangsuiqiao@live.cn

性与适应性研究在我国逐渐开展,然而由于研究基础薄弱,目前仍处于文献消化吸收、概念与科学问题的探讨、评价体系与评价方法探索的状况<sup>[19-22]</sup>,还不能满足各级决策者和不同利益相关人员的需求.因此,开展冰冻圈变化适应性研究,构建冰冻圈变化适应评价体系,发展适应评价理论与方法,探讨冰冻圈变化适应机制,综合评价冰冻圈变化适应对策,提高对冰冻圈变化适应的认知,是当前和今后一段时间冰冻圈科学研究的重要任务之一.

适应能力(adaptability)最早是由 Butzer<sup>[23]</sup>在可预测的气候变化和对世界食品供应的预期影响中提出;Watts 等<sup>[24]</sup>采用适应能力来表示短期的应对和长期的调整潜力.在人类系统领域,适应能力是指在一定环境条件下,人类系统增加个体生活质量的能力,包括社会生态系统对环境变化的能力以及促进与环境关系条件的能力<sup>[25]</sup>.从气候变化角度,适应能力是指系统适应包括气候变率和极端气候事件、减轻潜在损失、利用机会或对付气候变化后果的能力<sup>[26]</sup>.由于冰冻圈是气候系统的主要圈层之一,本文主要借鉴气候变化适应能力的定义.这样,冰冻圈变化适应能力是指系统适应冰冻圈变化及其影响、减轻潜在损失、利用机会或对付冰冻圈变化后果的能力.

本文以位于我国海洋型冰川区的玉龙雪山地区为例,在野外实地考察与社会调查的基础上,结合近年来玉龙雪山冰川变化及其影响的研究成果,构

建该地区冰冻圈变化适应能力评价指标体系,综合评价 1980—2008 年该地区对冰冻圈变化的适应能力,为相关部门制定适应对策提供科学依据.

## 1 资料与研究方法

### 1.1 研究区概况

玉龙雪山(27°10′~27°40′ N, 100°09′~100°20′ E)位于青藏高原东南端和横断山南端,主峰扇子陡海拔 5 596 m,是中国最南的一座雪山,也是欧亚大陆距赤道最近的海洋型冰川区.玉龙雪山分布有 19 条现代冰川,总面积 11.61 km<sup>2</sup>,积雪和冻土面积达 200 km<sup>2</sup>.行政区划上玉龙雪山地区包括丽江古城区和玉龙纳西族自治县,面积 7 647.4 km<sup>2</sup>,区域中心位于丽江市(图 1).该地区总人口 36.6 万人,有纳西、汉、白等十余个民族,其中纳西族人口 20.53 万人,占总人口的 58.67%.因区位优势不明显、交通不便,玉龙雪山地区工农业基础薄弱,长期处于传统农业阶段,社会经济与科教文卫相对滞后.

### 1.2 玉龙雪山地区冰冻圈变化及其影响

玉龙雪山地处丽江盆地的北缘,也是欧亚大陆距离赤道最近的现存冰川分布区.地处西部季风气候区,受西南季风和东南季风的影响,降水量较为丰富<sup>[25]</sup>,降水主要集中在 5—9 月,干湿季分明.随着全球气候变化,近 20 a 来本地区的冰川出现消融量增加、冰舌位置后退、冰川面积减少、雪线上升

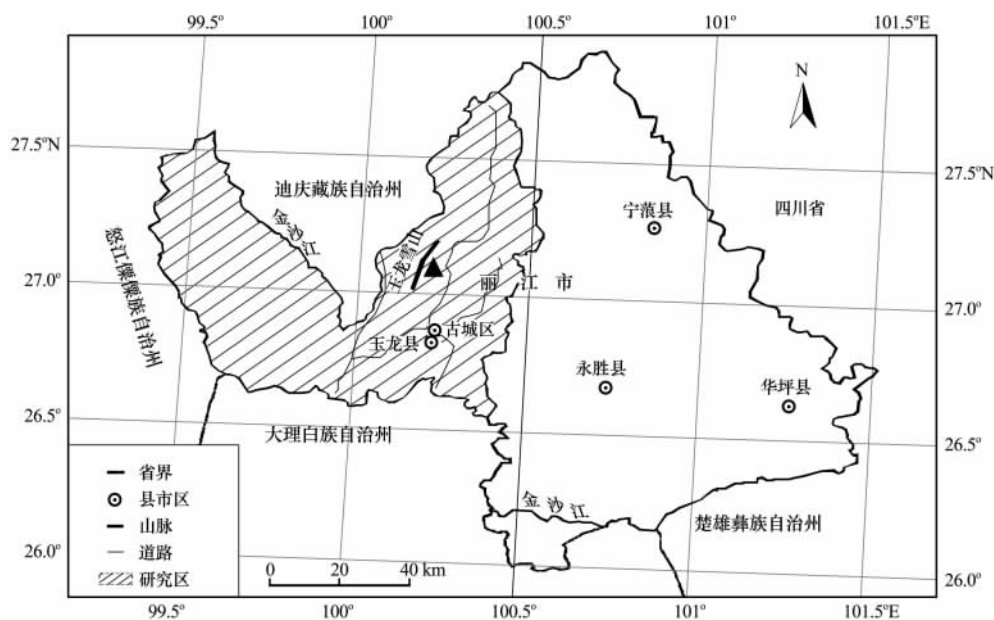


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Map showing the geographical location of the study area

现象<sup>[27-31]</sup>。玉龙雪山冰川的持续消融,一方面,将极大地影响区域内的水源补给,并将导致地质灾害的发生和部分生物物种的消亡<sup>[32]</sup>,对玉龙雪山区域内的气候反馈调节作用、生态环境产生极大的负面影响;另一方面,玉龙雪山是著名的冰雪旅游胜地,玉龙雪山的存亡与否严重影响着该地区经济的长足发展。调查显示,95%以上的受调查者认为玉龙雪山冰川变化对丽江地区气候、水资源与旅游业有重要影响。气候变暖,雪山冰川若消失将会使丽江的游客数量在目前的基础上减少一半以上,冰川变化对丽江旅游业的影响尤其显著<sup>[31]</sup>。目前对玉龙雪山冰川物质平衡、冰川化学、冰川物质、气候变化、以及冰川旅游的研究较为多见<sup>[29-33]</sup>,而对冰川变化的适应却鲜有涉及。

### 1.3 冰冻圈变化适应能力评价体系构建

#### 1.3.1 指标遴选原则

**关联性原则:**冰冻圈是我国自然生态环境的重要组成部分,其变化与影响有显著的地域性特点。在构建适应能力指标体系时,应紧密结合研究地区的实际情况,围绕生态-经济系统对冰冻圈变化及其影响的适应这一核心,遴选的指标应反映研究地区冰冻圈变化的适应能力状况与总体水平。

**全面性与合理性原则:**生态-经济系统对冰冻圈变化及其影响的适应是多方面的,既包括生态系统本身的自适应,也包括社会、经济系统的主动适应,而且在各个子系统中又涉及各种适应选择。因而,指标选取既要涵盖冰冻圈变化及其影响适应的各个方面,同时要兼顾科学、合理性。

**可操作性原则:**冰冻圈变化适应能力评价既涉及自然科学,又涉及人文社科等领域。因此,适应能力指标的选择,不仅应考虑所选指标的代表性,而且要考虑可测性与易测性,尽量简单实用,以便于科学评价。

#### 1.3.2 适应能力指标体系

依据上述原则,在详细分析玉龙雪山地区冰冻圈变化的特点与主要影响<sup>[29-35]</sup>的基础上,从生态、水资源、经济和社会系统4个方面遴选了20个适应能力指标,构建了玉龙雪山地区生态-经济系统对冰冻圈变化的适应能力评价体系,该体系包括目标层A、准则层B与指标层C三级(表1)。生态系统适应能力包括初级生产力、森林覆盖率、生态治理指数,这3个指标既反映了在冰冻圈变化条件下生态系统自身的物质能量状况,又反映了在人为有序干扰下生态系统的修复能力。在玉龙雪山地区,

水资源系统是冰冻圈变化影响的主要领域之一,不仅关乎下游聚居区的生产生活用水,而且关乎古城区的景观用水。为此,在评价体系中着重将水资源系统作为与生态、社会和经济系统并列的指标遴选准则,其具体指标包括水资源总量、人均水资源量、供水量、下游径流量。旅游业是玉龙雪山地区社会经济的支柱产业,冰冻圈变化不仅影响旅游景观的布局与旅游经济收益,而且从变化趋势来看,严重威胁山地冰川旅游的存亡,进而影响该地区旅游产业的可持续发展。故在经济系统指标中特地引入山地旅游指标,其他经济指标有地区GDP、GDP增长率、人均GDP、第二产业产值、固定资产投资、科学技术、基础建设、信息、知识与技能、制度、社会资本等。社会因素对于应对冰冻圈变化具有重要意义。本文社会系统指标包括人口城市化率、教育与科技水平、医疗水平、信息通达度、交通运输能力、政府惠农政策、居民对冰冻圈变化的应对程度,指标说明见表1所示。

#### 1.4 确定指标权重

层次分析法是目前评价研究领域应用比较广泛和成熟的一种方法,该方法将主观附权法中最优秀的专家打分法与客观附权法有机结合,故文中采用专家意见征询和层次分析法(Aalytic Hierarch Process, AHP)相结合的方法确定冰冻圈变化适应能力评价指标的权重。

依据AHP原理和方法,在建立递阶层次结构后,聘请有关专家自上而下对指标体系各层次指标进行两两重要程度判断比较,得出层次结构模型各层次的判断矩阵。为了使指标之间进行两两比较,得到量化的判断矩阵,根据心理学家的研究,人们区分信息等级的极限能力为 $7 \pm 2$ ,因此引入1~9的标度,见表2。

根据专家意见和层次分析法评判标度构建两两判断矩阵并计算判断矩阵的最大特征根和标准化的特征向量。本文采用和积法求取最大特征根和对应的特征向量。归一化处理判断矩阵(X)的每一列,即 $\bar{b}_{ij} = b_{ij} / \sum_{k=1}^n b_{kj} (i=1, 2, \dots, n)$ ,将按列归一化的判断矩阵,再按行求和,即 $\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \bar{b}_{kj} (i=1, 2, \dots, n)$ ,将向量 $\bar{W} = (\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n)^T$ 进行归一化处理,即 $W_i = \bar{W}_i / \sum_{i=1}^n \bar{W}_i (i=1, 2, \dots, n)$ ,则 $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ ,即为权重向量;计算判断

表 1 玉龙雪山地区生态-经济系统对冰冻圈变化适应能力评价体系  
Table 1 Evaluation systems of adaptive capacities of ecological-economic system to cryospheric change in the Mount Yulong

目标层(A)	准则层(B)	指标层(C)	指标说明
生态系统适应能力(B1)	初级生产力(C1)/(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )		说明陆地生态系统的初始物质和能量状况
		森林覆盖率(C2)/%	林业生态保护及治理状况,反映水源涵养、水土保持能力的程度
水资源系统适应能力(B2)	水资源总量(C4)/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> 人均水资源量(C5)/m <sup>3</sup> 供水量(C6)/km <sup>3</sup> 下游径流量(C7)/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	生态治理指数(C3)/%	当年造林或退牧还草、还林面积与区域面积之比
			反映水资源的富集程度
			水资源的保障能力
			反映供给工农业、生活的水量
经济系统支撑能力(B3)	地方财政收入(C8)/万元 GDP 增长率(C9)/%		主要反映地表径流水资源支撑能力
			主要反映地方适应的经济基础
冰冻圈变化适应能力(A)	雪山景观指数(C10)/% 第二产业产值(C11)/万元 山地旅游指数(C12)/% 固定资产投资(C13)/万元		说明经济基础适应能力的动态变化趋势
			雪山区面积与景区总面积之比,主要反映雪山在整个景区中的因子比重
			主要指工业产值,值越大适应能力越强
			山地旅游经济总量与地区旅游经济总量之比
			反映抗风险和适应冰冻圈变化的能力(包括农业、水利、交通及科教)
社会系统保障能力(B4)	人口城市化率(C14)/% 教育与科技水平(C15)/% 医疗水平(C16)/‰ 信息通达度(C17)/% 交通运输能力(C18)/km 政府惠农政策力度(C19) 居民对冰冻圈变化的应对意识(C20)		非农人口与全市人口之比,反映非农人口集中程度
			中等专业学校及以上学生教师数与地区人口比,反映教育支撑能力
			卫生技术人员占区域人口之比,反映医疗救助水平
			广电与电信覆盖率(平均值),反映信息通达程度
			衡量指标为交通里程数,反映区域交通运输保障能力
			说明政府在冰冻圈变化中对农业的支持力度

表 2 层次分析法评判标度及其含义  
Table 2 Evaluation scale and its implication in analytic hierarchy process

标度 $a_{ij}$ 的取值	判断规则
1	$i$ 指标与 $j$ 指标同等重要
3	$i$ 指标比 $j$ 指标略重要
5	$i$ 指标比 $j$ 指标较重要
7	$i$ 指标比 $j$ 指标非常重要
9	$i$ 指标比 $j$ 指标极为重要
2,4,6,8 倒数	为上述两两判断之间的中间状态的标度值 $i$ 指标与 $j$ 指标比较得 $a_{ij}$ , 反之得 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

矩阵的最大特征根, 即  $\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(BW)_i}{nW_i}$ ,  $(BW)_i$  表

示向量  $BW$  的第  $i$  个分量; 计算判断矩阵一致性指标  $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$  ( $n$  为判断矩阵的阶数); 计算判断矩阵的随机一致性比较  $CR = CI/RI$ . 经过计算得到各层次指标  $CR$  均小于 0.10, 均通过一致性检验. 根据以上计算结果, 最终可以求得评价指标各自的权重(表 3).

### 1.5 适应能力指数模型

冰冻圈变化适应能力评价体系中每一指标都从不同侧面反映不同年份研究区冰冻圈变化的适应能力水平, 为全面反映生态-经济系统对冰冻圈变化的综合适应能力, 还需进行综合评价. 本文采用多目标线性加权函数法, 通过对指标层  $n$  个指标进行加权处理, 计算冰冻圈变化适应能力综合评价指

表 3 冰冻圈变化适应能力评价各指标组合权重与排序

Table 3 Weight and sequences of the indexes of adaptive capacities to the cryospheric change

目标(A)	准则层(B)	权重	指标层(C)	权重	综合权重(Q)	排序
冰冻圈变化适应能力(A)	生态系统适应能力(B1)	0.16	C1	0.44	0.07	6
			C2	0.39	0.06	7
			C3	0.17	0.03	13
	水资源系统适应能力(B2)	0.18	C4	0.47	0.08	4
			C5	0.29	0.05	8
			C6	0.18	0.03	12
			C7	0.06	0.01	18
	经济系统支撑能力(B3)	0.37	C8	0.31	0.12	2
			C9	0.20	0.07	5
			C10	0.27	0.10	3
			C11	0.06	0.02	15
			C12	0.10	0.04	11
			C13	0.06	0.02	16
			C14	0.09	0.03	14
	社会系统保障能力(B4)	0.29	C15	0.17	0.05	9
			C16	0.04	0.01	19
			C17	0.06	0.02	17
			C18	0.46	0.13	1
			C19	0.16	0.05	10
			C20	0.03	0.01	20

数,具体模型如下:

$$A = \sum_{j=1}^n (C_{ij} \times Q_{ij}) \quad (1)$$

式中: A 为某时段冰冻圈变化适应能力综合指数,  $C_{ij}$  为指标层 C 第 j 年某单项指标的标准化值,  $Q_{ij}$  为指标层 C 单项指标在该层下的权重。

A 值大于零,表明冰冻圈变化适应能力处于各时间段平均水平之上, A 值小于零,表明冰冻圈变化适应能力处于各时间段平均水平之下,值越大,表明冰冻圈变化适应能力越大。

### 1.6 数据来源与处理方法

表 1 的 20 个评价指标中, 18 个(C1~ C18)为硬性指标, 其数据主要来自《丽江市统计年鉴》(1980—2003)、《丽江统计年鉴》(1949—2008 年)、《云南省统计年鉴》(1980—2003)、丽江市水资源公报(1980—2008)、中国西部环境与生态科学数据中心等。其中, 初级生产力(NPP)使用周广胜的模

型<sup>[36]</sup>计算而得, 玉龙雪山地区下游径流量为漾弓江流域木家桥水文站流量, 雪山景观指数计算方法为, 玉龙雪山白水一号冰川的冰川末端海拔与最高峰海拔之差为半径范围作为雪山区面积与整个玉龙雪山景区面积之比。C19 和 C20 为软性指标, 其中, 政府惠农政策以每年颁布的惠农政策为基准, 使用李克特五级量表<sup>[37]</sup>进行 1~5 级模糊量化, 按照重要性程度分别以 5、4、3、2、1 进行赋值, 当指标等级介于两相邻等级之间时, 相应评分为 4.5、3.5、2.5、1.5。居民对冰冻圈变化的应对意识处理方法同上。

需要说明的是, 本文研究时段为 1980—2008 年, 鉴于 2000 年前绝大多数统计数据是 5 a 间隔的, 故文中所有指标相应的也采用了同样的时间段。2001—2008 年数据是连续的(表 4)。

为消除各原始数据的量纲差异, 本文采用 Z—Scores 标准化对表 4 的原始数据进行标准化处理。当指标为正向指标时, 值越大越有利于冰冻圈变化适应能力的提升; 当指标为逆向指标, 值越小越有利于适应能力的提高时, 首先将逆向指标进行正向化处理, 然后以正向指标对待。

## 2 玉龙雪山地区冰冻圈变化适应能力综合评价

### 2.1 子系统对冰冻圈变化的适应能力

使用适应能力指数模型结合确定的各指标权重, 分别计算 1980—2008 年生态、水资源、经济与社会系统对冰冻圈变化的适应能力, 结果见图 2。1980—2008 年玉龙雪山地区生态系统适应能力呈上升趋势。20 世纪 80 年代, 生态系统适应能力较低; 自 90 年代以来, 丽江市开始实施天保工程, 生态环境得到了很大程度的改善, 森林覆盖率由 1980 年的 27% 显著增加到 2008 年的 66%, 生态系统适应能力相应的也明显增强; 2002 年后生态系统适应能力出现波动。表 3 显示, 初级生产力(NPP)是影响生态系统适应能力的最主要因素, 其次是森林覆盖率。在玉龙雪山地区, NPP 与降水量呈显著的正相关关系, 而与气温几乎没有相关关系(图略)。可见, 降水量的波动是 2000 年以来生态系统适应能力波动的决定因素。

玉龙雪山地区水资源系统适应能力呈前期增强, 后期下降态势, 分界点为 2002 年。在水资源系统中, 水资源总量指标对该系统适应能力的贡献最大, 为 47%(表 3)。而 1980—2008 年研究地区水资

表 4 1980—2008 年玉龙雪山地区冰冻圈变化适应能力指标原始数据

Table 4 Indexes of adaptive capacities to the cryospheric change in the Mount Yulong from 1980 to 2008

	1980	1985	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
C1	8.8	8.5	9.2	9	9.1	9.6	9.7	8.7	9.5	8.5	8.82	9.24	8.54
C2	27	27	27	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	52	52.5	52.5	52.6	66.13
C3	4174	13387	20667	32072	29508	24303	16673	23681	14322	7898	1467	15343	6744
C4	25.22	26.04	31.93	28.01	29.98	31.79	32.68	25.2	31.67	23.41	24.22	29.73	25.75
C5	9814	8651	9997	8435	8723	9161	9315	7189	8946	6586	6719	8124	6963
C6	3.91	4.04	4.95	4.34	4.65	4.93	5.07	3.91	4.91	3.63	3.76	4.61	3.99
C7	5.27	3.04	5.41	5.38	10.05	8.57	8.93	5.58	7.91	5.98	3.85	3.73	2.84
C8	705	1483	2986	5317	10762	12314	11665	13374	15490	20007	24338	36924	42095
C9	21.40	60.96	73.20	172.98	92.86	9.19	12.43	11.45	34.32	17.37	15.70	20.53	20.44
C10	0.39	0.57	0.54	0.50	0.48	0.47	0.47	0.46	0.45	0.44	0.42	0.42	0.41
C11	2197	3397	6965	19522	36497	37882	43441	58268	66561	77676	100706	117929	159998
C12	35.00	59.77	4.88	1.46	5.61	6.45	9.11	6.49	13.46	21.55	17.25	13.69	14.57
C13	1213	2914	2620	25711	80171	81548	105693	207059	324361	422091	442133	553913	702101
C14	14.86	15.62	15.85	16.93	19.12	19.53	20.22	20.36	21.86	22.98	22.90	22.48	22.46
C15	37.56	31.82	37.68	35.74	53.19	61.09	68.73	71.17	95.19	67.99	104.87	110.56	120.27
C16	2.47	2.76	3.29	3.48	3.34	3.31	3.47	3.28	3.68	3.74	3.85	4.76	4.47
C17	29.85	46.85	52.05	60.15	59.11	72.4	75.55	75.84	76.54	68.765	77.32	90.02	90
C18	2711	3364	3775	4234	6006	6006	6353	6368	6436	6436	6436	6436	7400
C19	1	1	1.5	1.5	2	2	2	2	3	3	3.5	4.5	5
C20	1	1	1	1	1.5	1.5	1.5	2	2.5	3	3	4	4.5

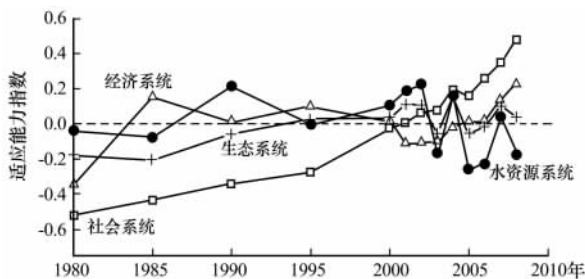


图 2 1980—2008 年玉龙雪山 4 个子系统适应能力变化  
Fig. 2 Variations of adaptive capacities of the four subsystems in the Mount Yulong from 1980 to 2008

源总量亦呈阶段性变化, 2002 年之前, 水资源总量在波动中增加, 之后在波动中急剧减少(图略)。可见, 水资源总量的变化是决定水资源系统适应能力变化的主要因素。生态系统与水资源系统适应能力具有非常好的一致性, 当水资源系统适应能力较弱时, 生态系统适应能力亦弱, 反之, 生态系统适应能力较强, 水资源系统一定意义上影响着生态系统适应能力的大小。

1980—2008 年玉龙雪山地区经济、社会系统

适应能力呈逐渐上升趋势。地区 GDP 是经济系统适应能力的主要影响因素, 其次是人均 GDP; 在社会系统中, 交通运输能力对适应能力的影响最大, 达到 46%。相比之下, 玉龙雪山地区经济、社会系统的适应能力明显优于生态、水资源系统的适应能力。

## 2.2 玉龙雪山地区对冰冻圈变化的综合适应能力

图 3 显示, 玉龙雪山地区生态-经济系统对冰冻圈变化的综合适应能力呈上升趋势。生态、水资源系统适应能力的波动, 在一定程度上被经济、社会系统适应能力的持续增强所抵消, 综合适应能力可由经济、社会系统适应能力大小所表征。图 4 也表明, 经济系统对综合适应能力的贡献最大, 达到 37%, 其次为社会系统, 为 29%, 水资源系统和生态系统分列第三、第四位。而从表 3 中可以看出, 交通运输能力对整个玉龙雪山地区总和适应能力影响最大, 其次为地方财政收入、雪山旅游指数和水资源总量。因此可以断定, 在玉龙雪山地区, 旅游业发展驱动下的生态环境和雪山保护政策, 地区经济实力的增强, 交通设施建设, 居民收入增加共同

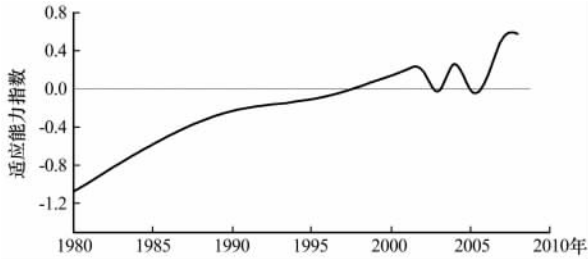


图 3 1980—2008 年玉龙雪山地区冰冻圈变化综合适应能力变化

Fig. 3 Variation of integrated adaptability of human-environment systems to cryospheric change in the Mount Yulong during the period of 1980 to 2008

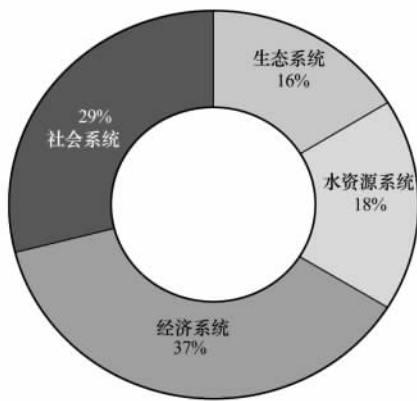


图 4 1980—2008 年子系统对研究地区冰冻圈变化适应能力的贡献

Fig. 4 Contributions of subsystems to the cryospheric change adaptability in the Mount Yulong from 1980 to 2008

助推了该地区综合适应能力的提升。

### 3 结论与讨论

玉龙雪山地区是我国最南的海洋型冰川区，对气候变化极为敏感。冰冻圈变化对该区水资源、旅游经济发展产生重要而又深远的影响。本文基于野外实地考察与社会调查，结合前人研究成果，在构建冰冻圈变化适应能力评价体系的基础上，建立了层次分析法与多目标线性加权函数法相结合的综合评价模型，对研究地区生态—经济系统对冰冻圈变化的适应能力进行了综合评价。

(1) 1980—2008 年玉龙雪山地区生态系统适应能力呈上升趋势，初级生产力(NPP)是影响生态系统适应能力的主要因素。20 世纪 90 年代以来实施的天保工程使森林覆盖率显著增加，也促进了该地区生态系统适应能力的增强；

(2) 与生态系统适应能力上升的趋势相反，1980—2008 年，水资源系统的适应能力呈下降态势，水资源总量减少是水资源系统适应能力降低的主要影响因素。

(3) 1980—2008 年玉龙雪山地区经济、社会系统适应能力呈逐渐上升趋势。地区 GDP 是经济系统适应能力的主要影响因素；在社会系统中，交通运输能力对适应能力的影响达到 46%，居首位。

(4) 1980—2008 年玉龙雪山地区生态-经济系统对冰冻圈变化的综合适应能力呈上升趋势。经济系统对综合适应能力的贡献最大，达到 37%，其次为社会系统，为 29%。在玉龙雪山地区，旅游业发展驱动下的生态环境保护，地区经济实力的增强，交通设施建设，居民收入增加共同助推了该地区综合适应能力的提升。

冰冻圈变化的脆弱性与适应性是目前各界普遍关注的热点，但由于基础薄弱，有关这些问题的研究仍处于起步阶段。本文以玉龙雪山地区为例，初步评价了系统对冰冻圈变化的适应能力，得出了一些初步的结论，但由于对冰冻圈变化适应认知仍具有一定的局限性，评价体系、评价方法均需进一步深入探讨。

### 参考文献(References):

[1] Solomon S, Qin Dahe, Manning M, *et al.* Climate Change 2007: The Physical Science Basis[M]. New York: Cambridge Univ. Press, 2007: 337—383.

[2] Shi Yafeng, Liu Chaohai, Wang Zongtai, *et al.* Concise China Glacier Inventory[M]. Shanghai: Shanghai Science Popularization Press, 2005: 17—20. [施雅风, 刘潮海, 王宗太, 等. 简明中国冰川编目[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005: 17—20.]

[3] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, *et al.* Geocryology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]

[4] Xiao Cunde, Liu Shiyin, Zhao Lin, *et al.* Observed changes of cryosphere in China over the second half of the 20<sup>th</sup> century: an overview[J]. Annals of Glaciology, 2007, 46:382—390.

[5] Qin Dahe, Xiao Cunde, Ding Yongjian, *et al.* Progress on cryospheric studies by international and Chinese communities and perspectives [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(6):649—656. [秦大河, 效存德, 丁永建, 等. 国际冰冻圈研究动态和我国冰冻圈研究的现状与展望[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6):649—656.]

[6] Zhao Lin, Ding Yongjian, Liu Guangyue, *et al.* Estimates of the reserves of ground ice in permafrost regions on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(1): 1—9. [赵林, 丁永建, 刘广岳, 等. 青藏高原多年冻土层中地下冰储量估算及评价[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 1—9.]

- [7] Li Xin, Cheng Guodong. Response model of permafrost in high altitude on global change [J]. Science in China (Series D), 1999, **29**(2): 185—192. [李新, 程国栋. 高海拔多年冻土对全球变化的响应模型[J]. 中国科学(D辑), 1999, **29**(2): 185—192.]
- [8] Jin Huijun, Li Shuxun, Wang Shaoling, *et al.* Impacts of climatic change on permafrost and cold regions environments in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, **55**(2): 161—173. [金会军, 李述训, 王绍令, 等. 气候变化对中国多年冻土和寒区环境的影响[J]. 地理学报, 2000, **55**(2): 161—173.]
- [9] Ren, Jiawen, Qin Dahe, Kang Shichang, *et al.* Glacier variations and climate warming and drying in the central Himalayas [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, **49**:165—169.
- [10] Kang Shichang, Chen Feng, Ye Qinghua, *et al.* Glacier retreating dramatically on the Mt. Nyainq ntanglha during the last 40 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, **29**(6): 869—873. [康世昌, 陈锋, 叶庆华, 等. 1970—2007年西藏念青唐古拉峰南、北坡冰川显著退缩[J]. 冰川冻土, 2007, **29**(6): 869—873.]
- [11] Li Zhongqin, Shen Yongping, Wang Feiteng, *et al.* Response of glacier melting to climate change —Take ürümqi Glacier No. 1 as an example[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, **29**(3): 333—342. [李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 冰川消融对气候变化的响应—以乌鲁木齐河源1号冰川为例[J]. 冰川冻土, 2007, **29**(3): 333—342.]
- [12] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Li Jing, *et al.* Glaciers in response to recent climate warming in Western China[J]. Quaternary Sciences, 2006, **26**(5): 762—771. [刘时银, 丁永建, 李晶, 等. 中国西部冰川对近期气候变暖的响应[J]. 第四纪研究, 2006, **26**(5):762—771.]
- [13] UNDP. Human Development Report ,2006[R]. New York : UNDP, 2006:165—166.
- [14] UNDP. Human Development Report 2007/2008—Fighting Climate Change: Human Solidarity in a Divided World[R]. New York: UNDP, 2008. <http://hdr.undp.org/en/reports/global/hdr2007-2008/>.
- [15] World Bank. World Development Indicators 2003[R]. CD-ROM, Washington, D. C. , 2005.
- [16] Xu J C, Arun B S, Ramesh A V, *et al.* The changing Himalayas; impact of climate change on water resources and livelihood in the Great Himalayas[R]. International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), Kathmandu, Nepal, 2008.
- [17] Yang Jianping, Tan Chungping, Liu Junfeng, *et al.* Building up the capacity of adapting to the climate change in the Himalayas of China: Demand Investigation and Analysis[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, **31**(1): 510—571. [杨建平, 谭春萍, 刘俊峰, 等. 我国喜马拉雅地区适应气候变化能力建设的需求调查与分析[J]. 冰川冻土, 2009, **31**(1): 510—571.]
- [18] Tan Chungping, Yang Jianping, Mi Rui. Analysis of the climatic change characteristics in the southern Tibetan Plateau from 1971 to 2007 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, **32**(6):1111—1120. [谭春萍, 杨建平, 米睿. 1971—2007年青藏高原南部气候变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2010, **32**(6):1111—1120.]
- [19] Fang Yiping, Qin Dahe, Ding Yngjian. Review of advance and orientation of vulnerability research [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, **31**(3):540—545. [方一平, 秦大河, 丁永建. 气候变化脆弱性及其国际研究进展[J]. 冰川冻土, 2009, **31**(3):540—545.]
- [20] Fang Yiping, Qin Dahe, Ding Yngjian. Global main approaches of risk and vulnerability assessment and implementation in scale transformation [J]. Arid Land Geography, 2009, **23**(3):319—326. [方一平, 秦大河, 丁永建. 全球风险和脆弱性评估方法及其尺度转换的局限性[J]. 干旱区地理, 2009, **23**(3):319—326.]
- [21] Fang Yiping, Qin Dahe, Ding Yngjian. Scientific issues of ecosystem vulnerability research in the source regions of Yangtze and Yellow River [J]. Journal of Mountain Science, 2009, **27**(2):140—148. [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[J]. 山地学报, 2009, **27**(2): 140—148.]
- [22] Yang Jianping, Zhang Tingjun. An overview of cryospheric vulnerability and its assessment methods in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, **32**(6):1084—1096. [杨建平, 张廷军. 我国冰冻圈及其变化的脆弱性与评估方法[J]. 冰川冻土, 2010, **32**(6):1084—1096.]
- [23] Butzer K W. Adaptation to global environmental change[J]. Professional Geographer, 1980, **32**:269—278.
- [24] Watts M J, Bohle H G. The space of vulnerability: the causal structure of hunger and famine [J]. Progress in Human Geography, 1993, **17**(1):43—67.
- [25] Smithers J, Smit B. Human adaptation to climatic variability and change[J]. Global Environmental Change, 1997, **7**(2): 129—146
- [26] IPCC. Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [27] He Yuanqing, Pu Tao, Li Zongxing, *et al.* Climate change and its effect an annual runoff in Lijiang Basin—Mt. Yulong Region[J]. China Journal of Earth Science, 2010, **21**(2):137—147
- [28] Pang Hongxi, He Yuanqing, Zhang Ningning, *et al.* Observed glaciohydrological changes in China's typical monsoonal temperate glacier region since 1980s [J]. Journal of Earth Science, 2010, **21**(2):179—188.
- [29] Ning Baoying, He Yuanqing, He Xiaozhong, *et al.* Potential impacts of glacier retreating of the Mt. Yulong on the socio-economic development in Lijiang city[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, **28**(6): 885—892. [宁宝英, 何元庆, 和献中, 等. 玉龙雪山冰川退缩对丽江社会经济的可能影响[J]. 冰川冻土, 2006, **28**(6): 885—892.]
- [30] Li Zongxing, He Yuanqing, Wen Yuhua, *et al.* Response of runoff in high altitude area over the typical Chinese monsoonal temperate glacial region to climate warming [J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 2010, **35**(1):43—50. [李宗省, 何元庆, 温煜华, 等. 我国典型海洋型冰川区高海拔区输出水量变化对气候变暖的响应[J]. 地球科学—中国地质大学学报. 2010, **35**(1):43—50.]
- [31] Wang Shijin, Zhao Jingdong, He Yuanqing. Adaptative strategy of mountain glacier tourism under climate warming background — A Case Study of Mt. Yulong Snow-Glacier-Geological Park [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **34**(1):207—213. [王世金, 赵井东, 何元庆. 气候变化背景下山地冰川旅游发展的适应对策研究—以玉龙雪山冰川地质公园



- 为例[J]. 冰川冻土, 2012, **34** (1): 207—213.]
- [32] He Yuanqing, Dian Zhang. Climatic warming is the major reason for glacier retreat on Mt. Yulong, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, **26**(2): 230—231. [何元庆, 章典. 气候变暖是玉龙雪山冰川退缩的主要原因[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(2): 230—231.]
- [33] Pu Tao, He Yuanqing, Zhu Guofeng, *et al.* Hydrochemical Characteristics of three rivers around Yulong Mountain in rainy season[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, **31**(6): 734—740. [蒲焘, 何元庆, 朱国锋, 等. 玉龙雪山周边典型河流雨季水化学特征分析[J]. 地理科学, 2011, **31**(6): 734—730.]
- [34] McCarthy J J, Canziani O F, Leary N A, *et al.* Climate change 2001: Impacts, adaptations, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [35] Schr ter D, Polsky C, Patt A. Assessing vulnerabilities to the effects of global change: an eight step approach. [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2005, **10** (4): 573—595.
- [36] Zhou Guangsheng, Zhang Xinshi. Study on NPP of natural vegetation in china under global climate change[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, **20** (1): 11—19. [周广胜, 张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究[J]. 植物生态学报, 1996, **20**(1): 11—19.]
- [37] Qi Laibin. Statistics analysis and fuzzy comprehensive evaluation of Likert scale [J]. *Shandong Science*, 2006, **19**(2): 18—23. [齐莱滨. 李克特量表的统计学分析与模糊综合评判[J]. 山东科学, 2006, **19**(2): 0018—23.]

## Adaptive Capacity Evaluation of Ecological-Economic System to Cryospheric Change——A Case Study in the Mount Yulong

YANG Sui-qiao<sup>1</sup>, YANG Jian-ping<sup>1, 2</sup>, WANG Shi-jin<sup>2</sup>, TAN Chun-ping<sup>1</sup>, LIU Jun-feng<sup>1, 3</sup>

(1. Heihe Key Laboratory of Ecohydrology and Integrated River Basin Science, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China; 3. Heihe Upstream Watershed Ecology-Hydrology Experimental Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

**Abstract:** In this paper, the Mount Yulong is taken as an example. Based on the relevance, comprehensiveness, rationality and operability, considering local cryospheric change features and the main influence factors, twenty indexes are chosen from the four systems: ecology, water resources, and economy and society system. To comprehensively evaluate the adaptive capacity to cryospheric change, an adaptive capacity evaluation system of ecological-economic system to cryospheric change and an adaptive capacity index model are established, which employ analytic hierarchy process (AHP) and multi-objective linear weigh-adding

function method. It is found that water resources system adaptive capacity reduced between 1980 and 2008, owing to the decrease of total water resources, while the others systems had a rising tendency. Comprehensive adaptive capacity to cryospheric change has enhanced, because of the environmental protection, development of economy, construction of transportation and increase of residents' income driven by tourism. The primary contribution to the enhancement is economy system, accounting for 37%, and the second is society system, accounting for 29%.

**Key words:** ecological-economic system; cryospheric change; adaptive capacity; adaptive capacity index; Mount Yulong