

# 玛河流域山区冰雪覆被变化与驱动因素的关联性分析

王雅君, 徐丽萍, 郭 鹏

(石河子大学 理学院, 新疆 石河子 832003)

**摘 要:**对 1977—2013 年 Landsat 影像运用监督分类进行解译获取冰雪覆被信息,并运用回归分析法对其驱动因素进行分析。结果表明:(1) 冰雪覆被消融面积为 2 372.92 km<sup>2</sup>,年均消融速率为 2.1%。冰雪覆被斑块由大面积破碎,转向小面积斑块消失。(2) 驱动因素中气温、人口、GDP 在 0.01 水平上显著相关。冰雪覆被变化趋势滞后于气温变化趋势 13~15 a,滞后于 GDP 变化趋势 5 a,与人口变化呈非线性相关。驱动因素中坡度、坡向的影响为冰雪覆被分布趋于缓坡且多分布在西坡,雪线高度也逐年上升。(3) 驱动因素与冰雪消融关联强度的顺序为:气温>人口>GDP,气温为主要影响因素。

**关键词:**冰雪覆被; 驱动因素; 关联性; 玛纳斯河流域

**中图分类号:**P461<sup>+</sup>.6

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2016)06-0303-06

## Snow Cover Change Driving Mechanism and Coping Strategies in Manas River Basin

WANG Yajun, XU Liping, GUO Peng

(College of Sciences, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

**Abstract:** The driving factors of ice and snow cover are analyzed based on 1977 to 2013 Landsat image by using supervised classification interpretation for ice and snow cover information, and using the regression analysis. The results show that: (1) the area of melting snow and ice cover is 2 372.92 km<sup>2</sup>, an average annual rate is 2.1%, ice and snow cover patches with segments at large scale shift, to disappearance of small patches; (2) driving factors of temperature, population, GDP are significantly correlated at the level of 0.01, ice and snow cover change lags behind temperature for 13 to 15 years, lags behind the GDP change for 5 years, is nonlinearly related to population change, the gradient and aspect of slope drive ice and snow cover to distribute in gentle slope and west-facing slope, snow line height also increases year by year; (3) the order of the driving factors associated with snow and ice melt strength is as follows: temperature> population> GDP, temperature is regarded as the main influencing factor.

**Keywords:** ice and snow cover; driving mechanism; correlation; Manas River Basin

冰川和永久积雪是冰冻圈的重要组成部分,对气候变化响应敏感,是气候变化的指示器<sup>[1]</sup>。同时冰雪覆被作为固态水资源,对区域生态环境的平衡与稳定起着至关重要的作用。近年来冰雪覆被呈现出了不同程度的消融,尤其是山地冰川在近 30 多年来除了青藏高原地区少数冰川有前进或稳定现象外,大部分冰川都呈加速消融趋势<sup>[2-4]</sup>。在探讨冰雪覆被消融影响因素方面,国内外学者做出很多努力。Chinn T J, Granshaw, Hall M H P<sup>[5-6]</sup> 分别对新西兰 127 条冰川、北美洲黄石公园冰川进行研究发现冰川面积都有

不同程度的缩减,与此同时,气温却增加明显。何毅、冀琴等对博格达峰地区、念青唐古拉山等地区冰川与气候间变化分析,认为自然因素中的气温升高是导致冰雪覆被退缩的主要原因<sup>[7-8]</sup>。一些学者对玛河流域山区冰雪覆被变化自然驱动因素进行了研究<sup>[9]</sup>,但在冰雪覆被消融自然与人类活动共同驱动机制方面并没有全面的进行分析。

玛纳斯河流域(以下简称“玛河”)气候自 1987 年开始由暖干向暖湿转型,气温升高,降水量增加<sup>[10]</sup>。该流域是新疆典型内陆河流域,也是中国最大的人工

收稿日期:2015-11-02

修回日期:2015-12-09

资助项目:石河子大学科学技术研究发展计划项目“全球气候变化下玛河流域山区近 30 年冰雪变化对气候响应的机制及应对策略研究”(2011ZRKXTD-0505)

第一作者:王雅君(1992—),女,河南南阳人,硕士研究生,研究方向:景观生态学。E-mail:yajun9205@163.com

通信作者:徐丽萍(1978—),女,新疆库尔勒人,石河子大学理学院副教授,研究方向:土地覆被变化与景观生态。E-mail:xlpalw@sina.com

绿洲<sup>[11]</sup>。20世纪70年代以来,玛河流域径流量总体上出现上升趋势<sup>[12]</sup>。冰雪覆被消融引起水资源的变化或对气候的响应关系成为更多学者关注的焦点<sup>[9,12-14]</sup>,但冰雪覆被消融不仅是气候变化的结果,人类活动如土地利用方式变化、人口增长、经济发展等影响大气下垫面,下垫面的改变对地表空气温、湿度变化趋势亦存在影响<sup>[15]</sup>,进而改变冰雪覆被消融速率,影响其分布特征。基于此,本文选取近年来玛纳斯河流域山区冰雪覆被格局进行分析,结合气象观测数据以及其他社会统计资料探讨该区域冰雪覆被变化的驱动力,确定主导驱动因素,量化其贡献率大小,以期对径流量变化预测、灾害应对和中下游用水分配提供依据。

## 1 研究区概况

玛纳斯河(以下简称玛河)流域地处亚欧腹地,新疆天山北麓、准噶尔盆地南沿,发源于天山北坡的伊连哈比尔尕山脉。该流域位于 $43^{\circ}20'—45^{\circ}55'N$ , $85^{\circ}01'—86^{\circ}42'E$ ,生态环境非常脆弱<sup>[16]</sup>。最高海拔为 $5\,000\sim5\,500\text{ m}$ <sup>[17]</sup>,海拔 $3\,600\text{ m}$ 以上山区分布有大面积冰川及永久积雪<sup>[12]</sup>,现代冰川比较活跃。据中国冰川目录统计数据显示,玛纳斯河是准噶尔内流水系中冰川数量最多和规模最大的河流,在玛河流域共有冰川 $1\,379$ 条,冰川总面积 $1\,035.68\text{ km}^2$ <sup>[18]</sup>,总储量 $73.02\text{ km}^3$ ,该流域内冰川面积占天山北麓冰川面积的 $32\%$ <sup>[13]</sup>。

流域上游包括清水河乡、151团场、东湾镇等,主要以农牧业生产为主,人口 $5.6$ 万人;中游绿洲城市区包括玛纳斯县、石河子市、沙湾县,已成为带动绿洲经济发展的增长极、人口的聚居区和新兴的工业区,人口 $54$ 万人;下游荒漠区则指的是绿洲外围的沙漠覆盖区域。

## 2 研究数据与方法

### 2.1 数据来源

本文选取了1977年Landsat MSS影像数据,1990年、2000年、2005年、2010年和2013年玛河流域相同时相无云或少云的Landsat TM/ETM+/8影像数据,由美国地质勘察局(USGS)官方网站(<http://www.usgs.gov>)下载,八月份山区积雪消融达到最大值,因此本文选取夏季八月影像资料,降低季节性积雪带来的误差。气象数据来自于国家气象信息中心(<http://www.nmic.gov.cn/>),本文选取石河子市、玛纳斯县、沙湾县等地五个实测气象站点数据,通过对气象站点数据进行空间插值模拟山区气象数据。石河子市及其周

边县市、团场等地区人口、经济以及政策变化等相关数据来源于统计年鉴和政府网站。

### 2.2 研究方法

首先利用ENVI 5.1对影像进行校正、拼接以及裁剪等预处理,采用最大似然分类器获取积雪分类结果,同时为了保证数据质量,最后需要目视解译对其进行修正,提高其精度。分类后产生很多细小破碎的斑块,采用Majority/Minority分析方法,以 $3\times3$ 窗口进行小斑合并或重分类,Kappa系数均超过 $0.85$ 。将处理后的栅格图像转换为矢量文件,加载到ARCGIS中进行进一步的图像处理,从而获取冰雪覆被变化相关参数。再运用Fragstats 3.3软件对冰雪覆被格局进行分析,本文选取斑块个数(NP)、平均斑块面积(AERA\_MN)、斑块密度(PD)、面积加权平均分维度(AWMPFD)、面积加权形状指数(AWMSI)等5个指数,具体指数指标详见文献<sup>[19]</sup>。

结合冰雪覆被信息与自然、社会两方面因素,以探求冰雪覆被变化驱动力。首先运用SPSS软件的相关分析对自然因素、社会因素两方面19个变量进行筛选,在此基础上再运用主成分分析法计算驱动因素对冰雪覆被变化的贡献率。

**2.2.1 建立驱动力回归模型** 多元线性逐步回归法是通过建立多个自变量进行回归分析的数学模型,在逐步进行回归分析的过程中剔除无驱动力的变量,保留统计上有显著驱动影响的自变量,建立驱动力模型<sup>[20]</sup>:

$$Y=\beta_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\dots+\beta_mx_m+\epsilon \quad (1)$$

式中: $x$ 为自变量; $Y$ 为因变量; $\beta$ 为待定系数; $\epsilon$ 为随机误差项,表示为除 $x$ 以外其他随机因素对 $Y$ 影响的总和。

**2.2.2 构建冰雪覆被消融发展指数** 利用SPSS 19.0统计分析软件,应用主成分分析法(Principal component Analysis)对标准化的数据进行分析,获得各主成分得分。根据各主成分的贡献率,计算冰雪覆被消融发展指数<sup>[21]</sup>。

$$F_i=\sum_{n=1}^k F_{in}a_n \quad (2)$$

式中: $F_i$ 为 $i$ 年冰雪覆被消融各指标发展指数; $a_n$ 为第 $n$ 个主成分的贡献率( $n=1,2,3,\dots,k$ ); $F_{in}$ 为第 $i$ 年的第 $n$ 个主成分得分。

## 3 结果与分析

### 3.1 冰雪覆被格局变化趋势

1977—2013年玛河流域冰雪覆被斑块面积期间虽有小幅度上升,但总体上是呈减少趋势,且呈严重地消融退缩态势(图1)。冰雪覆被面积从1977年的

3 118.60 km<sup>2</sup> 减少至 2005 年的 1 119.20 km<sup>2</sup>,而后增加至 2010 年的 1 275.05 km<sup>2</sup>,2013 年又迅速减少至 745.78 km<sup>2</sup>,37 a 间减少了 2 372.92 km<sup>2</sup>,退缩率达到 76.1%,年均变化率(APAC)为 2.1%。其中 2010—2013 年为冰雪覆被严重消融期,仅 3 a 消融量就为 2010 年的 41.5%,年均变化率超过了 10%,远远高于平均水平。总而言之,随着全球气温的普遍升高,该区域冰雪面积呈退缩趋势,近 37 a 冰雪覆被消融趋势总体上为“慢—快—慢—快”。

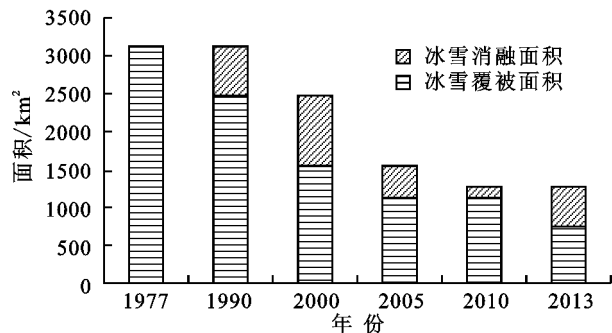


图 1 1977—2013 年冰雪覆被面积变化

在斑块类型水平上,1977 年以来,冰雪斑块个数(NP)为先增加后减少,其中 1977 年数量最少,仅为 330 个,而到 1990 年增速明显,之后有逐步下降(图 2)。与此相反,平均斑块面积(Area\_MN)则是先减少后增加。斑块密度由 1977 年的 0.11 增长至 2005 年的 0.95,之后降为 0.43,2013 年仅为 0.71。从 NP 和 Area\_MN 指数来看,1977 年冰雪覆被斑块虽少,但平均斑块面积大,而到 20 世纪 90 年代以后冰雪覆被斑块开始破碎化,导致 1990 年斑块数迅速增加,一直持续到 2005 年,在此期间不断的有大面积斑块破碎,小面积斑块消失的现象。而后随着冰雪覆被持续消融,小斑块冰雪覆被消失,斑块数目也逐渐减少。

面积加权形状指数(SHAPE\_AM)和面积加权平均分维度(PAFRAC)总体变化趋势相同(图 3),1990 年为最高值,之后逐步降低。从这两个指数可以发现,1990 年之后,玛河流域山区冰雪覆被斑块破碎度增加,且形状也变得不规则,反映了冰雪覆被消融形势的严峻。

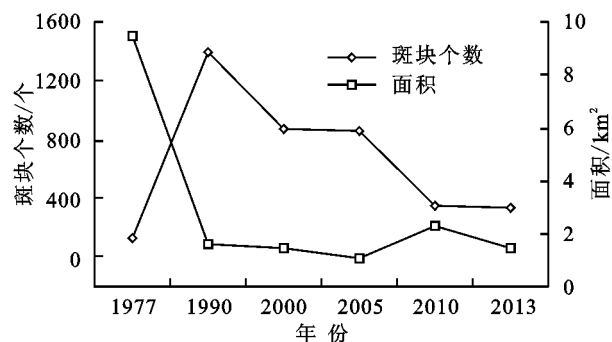


图 2 玛河流域冰雪覆被斑块个数与平均面积

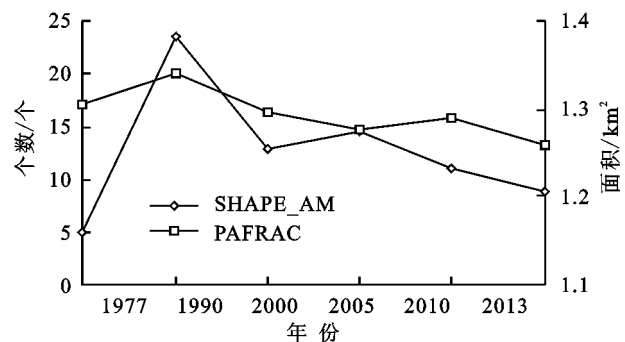


图 3 玛河流域冰雪覆被 AWMPFD 和 AWMFI

### 3.2 驱动因素及其关联性分析

为了更加全面考虑自然、社会两大因素对冰雪覆被变化的影响,揭示冰雪覆被变化的驱动力。本文选取气温、降水、坡度、坡向、海拔高度、玛河流域内各市县的人口变化、城镇化率、GDP 经济发展、人口密度、各产业产值、政策以及市场的变化趋势、农业机械总动力等 17 个相关因素。对除坡度、坡向、海拔高度、政策等以外 14 项因素进行相关性分析。通过相关性分析发现,气温、人口、GDP 在 0.01 水平上显著相关,为冰雪覆被变化的主导因子,与其他因素呈弱相关或不显著相关。

### 3.3 自然驱动因素空间关联性分析

3.3.1 气温因素影响分析 在全球变暖的背景下,玛河流域年平均气温也有逐年增长的趋势(图 4)。通过相关性分析发现,在该区域冰雪覆被变化与气温呈显著相关达到-0.89,而降水对冰雪覆被消融并不显著,因此气温变化是冰雪覆被消融的决定因素之一。玛河流域近 37 a 气温年均变化出现不同程度的波动上升趋势,共分为五个周期,且周期时间越来越短。对冰雪覆被 37 a 变化建立 2 d 移动平均,同样将其间划分为五周期(图 5),发现周期不断缩减,周期时间由 13 a 减至 3 a。周期时间逐渐缩短,与此同时 APAC 多为负值,且变化量不断增加,仅有周期 2005—2010 年出现正值。由此可见,冰雪覆被消融变化与年均气温存在强相关性。为进一步研究冰雪覆被与气温作用的关联性,本研究将 6—8 月定为暖季、反之则为冷季。对其气温变化趋势分析发现,在冷季,年际变化趋于缓和,波动范围逐渐缩小;相反暖季气温增长速度强于冷季,年际变化明显,波动范围大。在气温变化中,暖季升温是冰雪覆被消融主要因素。虽然冰雪覆被消融与降水量之间没有关系,但一些学者认为降水量的缓慢增加对冰雪储量是有一定贡献的,但是由于气温增速过快,并不能弥补这一损失<sup>[22]</sup>。

王宁练等<sup>[23]</sup>认为冰雪覆被面积变化对气温响应滞后于气候变化 12~13 a。近 37 a 玛河流域暖季气温总体呈上升趋势,但其间也出现了低温周期。与此

同时,冰雪覆被面积在 1977 年之后也一直处于消减的情况下,1992—1995 年明显出现低温周期,在 2005—2010 年冰雪覆被变化也出现了累积的现象,2010 年达到最大值,年均增加量高达 2.8%,冰雪覆被变化滞后于气候变化 13~15 a,与王宁练结论基本吻合。同时发现,气温在近 37 a 最高温仅超过均值 0.92℃,最低值却低于均值 1.06℃,但冰雪覆被消融速率却远远高于冰雪覆被增加速率,表明在增加或减少相同温度的情况下,冰雪覆被面积增加量并不等于减少量,还与气温高温或低温持续的时间长短有关。

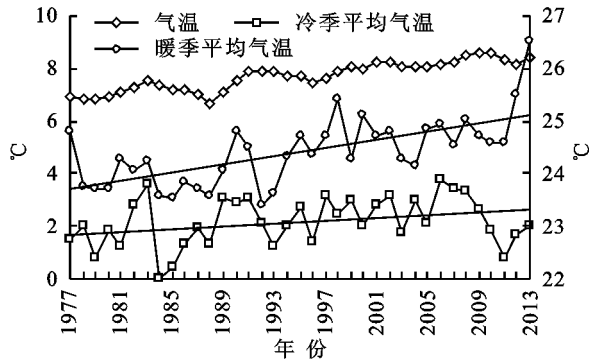


图 4 玛河流域气温年均变化趋势

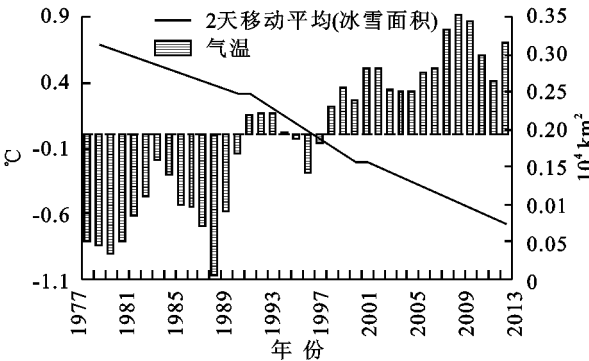


图 5 气温、冰雪覆被面积变化趋势

3.3.2 地形影响因素分析 在自然因素驱动中,不仅气温因素对冰雪覆被消融产生影响,坡度、坡向等地形因素也影响冰雪覆被消融的空间分布。在坡向方面,受太阳辐射的影响,各坡向冰雪覆被存储面积并不相同。对该流域影像分北、东北、东、东南、南、西南、西、西北八个方向进行不同坡向面积统计,其中东南坡存储面积最小,仅为 10.66%;之后依次是南坡、北坡、西北坡、东坡、西南坡、东南坡,西坡存储面积为最多(图 6)。这可能是由于太阳辐射、坡度、风向等因素综合造成的。

冰雪覆被分布随着坡度的不同也具有很大差异。冰雪覆被主要分布区间在 0°~50°,且 20°~40°坡度间冰雪覆被所占百分比为最多,坡度超过 88°地区没有冰雪覆被。将坡度以 10°为一级,划分九个等级。在低坡度 0°~10°地区,冰雪覆被面积所占百分比逐渐增

加,坡度 $\geq 50^\circ$ 区域尤其是 $\geq 80^\circ$ 区域百分比在 2000 年后直线下降。随着冰雪覆被面积的减少,陡坡地区冰雪覆被面积逐渐退缩,冰雪覆被趋向于缓坡分布,由于在近 37 a 没有明显的山体移动,因此坡度对冰雪覆被变化的影响不显著。

随着冰雪覆被消融现象的加剧,雪线高度也有一定的变化(图 7)。37 a 间雪线高程逐渐上升,由 1977 年的 1 415 m 上升到 2013 年的 2 592 m,期间在 2000 年虽稍有下降,但并不明显,尤其在 2010—2013 年雪线上升十分迅速。

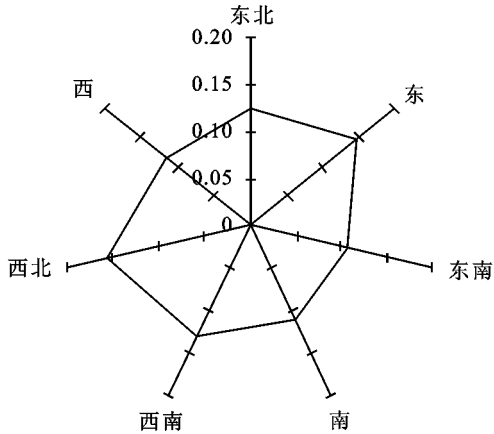


图 6 1977—2013 年各坡向、坡度冰雪覆被面积变化率

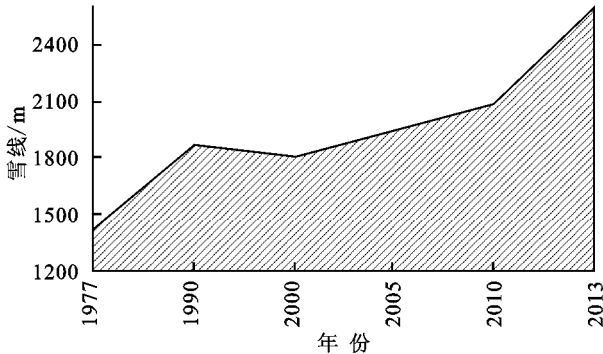


图 7 雪线变化

3.4 冰雪覆被消融与社会因素的关联性

3.4.1 人口因素的影响 本文通过对玛河流域内石河子市及周边县市、团场人口近 23 a 人口进行统计分析显示,各县市人口均出现明显增长,其中石河子市和昌吉市增长幅度明显(图 8)。尽管人口变化与冰雪覆被面积变化之间没有明确的线性关系,但由人口的变化引起的城市建设面积扩大,碳排放增加、生态环境遭到破坏等一系列问题还是对冰雪覆被消融产生了影响。

3.4.2 经济因素的关联性 通过对该流域内各县市进行调查分析,近 23 a 来 GDP、全社会固定资产投资总额、社会消费品零售总额出现波动中总体增长(图 9)。总体来看,GDP、全社会固定资产投资总额、社会消费品零售总额在 2000 年左右都有不同程度的衰退,

之后开始迅速增长,尤其是 2004 年之后增速明显,呈现“升—降—升”的变化特点,这与冰雪覆被面积变化趋势一致。表明 GDP、社会消费品零售总额等因素与

冰雪覆被变化存在关联性,且冰雪覆被变化滞后于经济变化 5 a。这与诸多学者提出的人类活动也是导致冰雪覆被消融关键因素之一这一观点相吻合<sup>[24]</sup>。

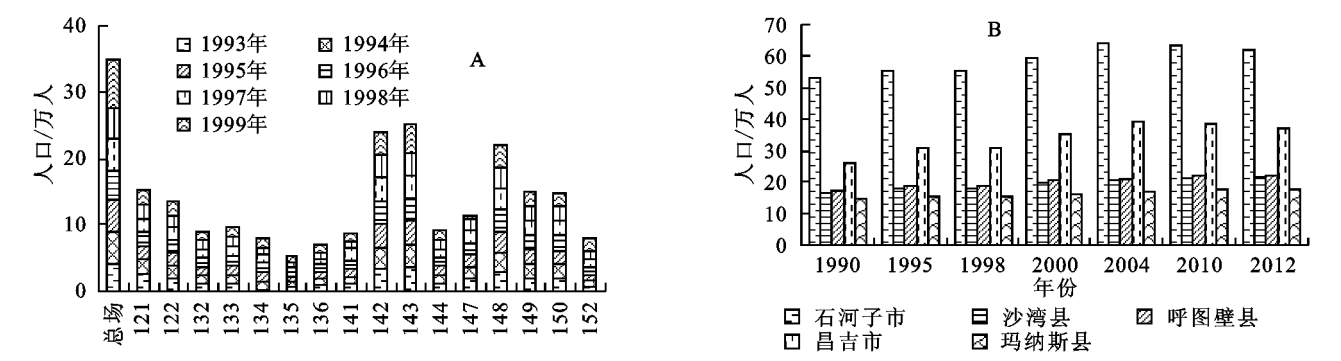


图 8 团场人口变化趋势图(A)、县市人口分布变化趋势(B)

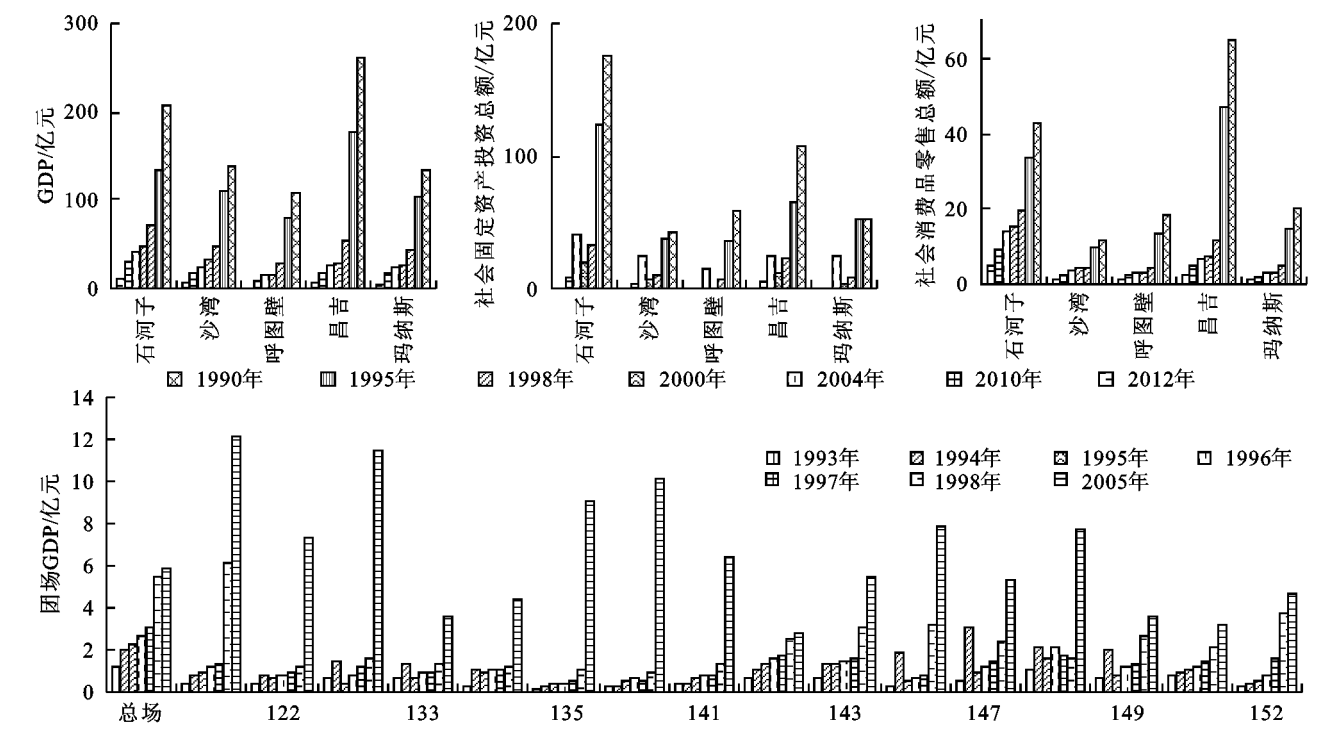


图 9 县市经济变化趋势、团场 GDP 变化趋势

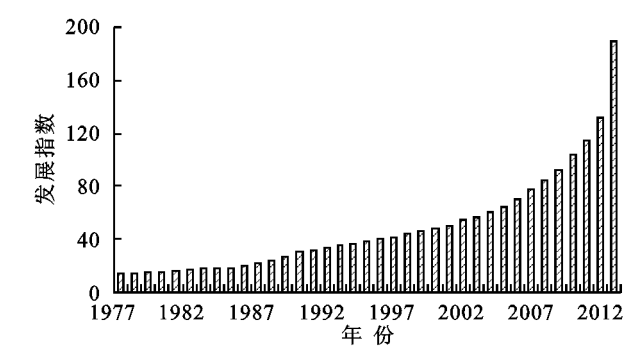


图 10 冰雪覆被消融发展指数

### 3.5 冰雪覆被变化的驱动机制

玛河流域冰雪覆被变化是自然因素和社会因素共同作用的结果。受降水、气温、坡度、坡向等自然因素的影响,冰雪覆被消融速率发生变化,由此引起径流量的变化。径流量与人类生活是息息相关的,影响着河岸植被、耕地、工业用水以及生活用水的分配。

耕地的变化直接影响了粮食播种面积的变化,从而影响第一产业产值的变化,加之农业机械总动力的影响,农业人口也随之发生变化,进一步改变了城镇化率;工业用水的变化影响了第二产业的产值;生活用水的改变也影响了人口容量,改变人口密度,间接地影响了消费品零售,改变第三产业产值,结合第一、二、三产业的变化就可以改变该流域的 GDP,而人类的对自然因素也有一定的影响,改变了冰雪覆被的变化。从冰川融水到径流量变化改变土地利用类型,再到影响人类生活,虽然各项因素之间均存在相互联系,但影响各因素发展的究其根源还是冰川的变化。因此,冰雪覆被的变化该流域发展密不可分。

为更深层次的测度冰雪覆被消融主要驱动因素及其间的关联性,对近 37 a 冰雪覆被变化的驱动因素首先进行标准化处理,在此基础上分析气温、人口、

GDP 等因素对冰雪覆被变化的贡献率,方差累计贡献率超过 85%。人口、气温、GDP 与冰雪覆被消融具有很强的相关性,构建冰雪消融发展指数模型拟合方程如下:

$$F=0.604x_1+0.584x_2+0.542x_3 \quad (3)$$

式中: $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  分别代表人口、气温、GDP。由此可以得出各年份冰雪覆被消融发展指数(图 10),随着年份的增长,发展指数不断增加,尤其 90 年代以来,增长幅度骤然增加,冰雪覆被消融趋势加剧。

对驱动因素与冰雪覆被面积变化进行线性回归拟合,得到如下回归分析模型:

$$y=4440.919-1.139x_1-44.508x_2-92.626x_3 \quad (4)$$

式中: $x_1$  为 GDP; $x_2$  为人口; $x_3$  为气温。人口、气温、GDP 与冰雪覆被面积变化均为负相关,且对冰雪覆被变化影响强度顺序为:气温>人口>GDP。自然因素为主要影响因素。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

在国内外研究中,冰雪覆被消融驱动因素的分析受到了众多学者的关注,诸多学者更多关注冰雪消融与气候因素间的关系,本研究将冰雪消融发展指数与线性回归模型两种方法相结合,探究玛纳斯河流域山区冰雪覆被变化驱动机制,研究结果同我国总体冰雪覆被变化驱动机制分析基本相吻合,与卢新玉<sup>[9]</sup>等研究结果一致。随着全球变化形势的加剧,从根源解决冰雪消融,控制气温上升、人口增长、GDP 发展,采取相应措施显得尤为重要。本研究选取 17 项影响因素全面分析其驱动机制,但未能对其各项因素深入分析,此方面将是下一步重要研究方向。

### 4.2 结论

(1) 对整个流域遥感影像的地物进行提取,可以看出冰雪覆被面积逐渐减少,近 37 a 冰雪覆被面积减少约 76.1%,冰雪消融面积为 2 372.92 km<sup>2</sup>,年均消融速率为 2.1%。

(2) 从自然因素关联性方面可以看出,气温是主要因素,尤其是暖季气温,雪线海拔上升,坡度趋向平缓地区,坡向趋于阴坡;社会因素关联性方面,人口增长,经济发展都是促使冰雪消融的主要原因。

(3) 对冰雪覆被消融驱动机制方面分析,冰雪覆被消融发展指数不断上升,消融趋势并不乐观;对冰雪覆被变化影响强度顺序为:气温>人口>GDP,气温为主要影响因素。

### 参考文献:

- [1] 施雅风. 中国冰川与环境:现在、过去和未来[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [2] 白磊,郭玲鹏,马杰,等. 基于数字相机拍摄影像的山区积雪消融动态观测研究:以天山积雪站为例[J]. 资源科学,2012,34(4):620-628.
- [3] Suzan Lapp, James Byrne, Ivan Townshend, et al. Climate warming impacts on snowpack accumulation in an alpine watershed[J]. International Journal of Climatology, 2005, 25(4):521-536.
- [4] 刘巧,刘时银,张勇,等. 贡嘎山海螺沟冰川消融区表面消融特征及其近期变化[J]. 冰川冻土,2011,33(2):227-236.
- [5] Chinn T J. New Zealand glacier responses to climate change of the past century[J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1996,39(3):415-428.
- [6] Granshaw F D, Fountain A G. Glacier change(1958—1998) in the north Cascades national park complex, Washington, USA[J]. Journal of Glaciology, 2006,52(177):251-256.
- [7] Yi H E, Taibao Y. 博格达峰地区气候变化特征及其对冰川变化的影响[J]. 地理科学进展,2014,33(10):1387-1396.
- [8] 冀琴. 念青唐古拉山西段近 40 年冰川与气候变化研究[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(7):12-18.
- [9] 卢新玉,谢国辉,李杨,等. 玛纳斯河流域积雪变化特征及其与气温、降水的关系[J]. 沙漠与绿洲气象,2010,4(2):35-39.
- [10] 沈永平. 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.
- [11] 王东方,张风华,孙自武,等. 近 60 年来玛纳斯河流域气候时空变化趋势分析[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(5):335-241.
- [12] 张正勇. 玛纳斯河流域冰川变化及水资源研究进展[J]. 水土保持研究,2014,21(5):332-338.
- [13] 刘艳. 玛纳斯河流域融雪径流与积雪—气象因素分析[J]. 水土保持研究,2010,17(2):145-149.
- [14] 王雅君,徐丽萍,郭鹏,等. 1977—2013 年玛河流域山区冰雪覆被消融态势分析[J]. 水土保持研究,2015,22(6):208-212.
- [15] 贺晓冬. 城市不同下垫面小气候特征对比研究[C]//中国气象学会年会,2011.
- [16] 郭鹏. 近 20a 来玛纳斯河流域南山冰雪动态变化特征分析[J]. 地球信息科学,2014,16(5):762-769.
- [17] 尹小君. 新疆玛纳斯县域土地利用变化对景观生态系统的影响[J]. 水土保持研究,2008,15(3):77-80.
- [18] 徐根生. 玛纳斯河上游积雪变化及其与径流量相关性研究[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学,2010.
- [19] 许倍慎. 江汉平原土地利用景观格局演变及生态安全评价[D]. 武汉:华中师范大学,2012.

- (6):173-177.
- [16] 贾玉奎,李钢铁,董锦兰. 乌兰布和沙漠固沙林土壤水分变化规律的初步研究[J]. 干旱区资源与环境,2006,20(6):169-172.
- [17] Yang W B, Feng W, Jia Z Q, et al. Soil water threshold for the growth of *Haloxylon ammodendron* in the Ulan Buh desert in arid northwest China[J]. South African Journal of Botany, 2014,92:53-58.
- [18] Zhu Y, Jia Z. Soil water utilization characteristics of *Haloxylon ammodendron* plantation with different age during summer[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(6):341-346.
- [19] 杨艳凤,周宏飞,徐利岗. 古尔班通古特沙漠原生梭梭根区土壤水分变化特征[J]. 应用生态学报,2011,22(7):1711-1716.
- [20] 李爱德,赵明,王耀林. 民勤地区不同林龄梭梭林地水分平衡研究[C]//王继和. 甘肃治沙理论与实践. 兰州:兰州大学出版社,1999,77-83.
- [21] 刘乃君. 人工梭梭林对沙地土壤理化性质的影响[J]. 土壤通报,2008. 39(6):1480-1482.
- [22] 王勇辉,郭双双,海米提·依米提. 精河河下游河岸带土壤养分与盐分特征分析[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(3):133-138.
- [23] Jiménez J J, Lal R, Russo R O, et al. The soil organic carbon in particle-size separates under different re-growth forest stands of north eastern Costa Rica[J]. Ecological Engineering, 2008,34(4):300-310.
- [24] 黄丕振,刘志俊,崔望诚. 梭梭集水造林初步研究[J]. 新疆农业科学,1985(6):23-25.
- [25] 李银芳. 利用龟裂地径流的两种集水方式进行梭梭造林[J]. 林业实用技术,1986(10):17-20.
- [26] 张培林. 沙地梭梭林的营造[J]. 新疆林业,1990(3):16-17.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [28] 宋于洋,胡晓静. 古尔班通古特沙漠不同生态类型梭梭地上生物量估算模型[J]. 西北林学院学报,2011,26(2):31-37.
- [29] Ma Q L, Wang J H, Zhu S J. Effects of precipitation, soil water content and soil crust on artificial *Haloxylon ammodendron* forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007,27(12):5057-5067.
- [30] 常兆丰,韩福贵,仲生年,等. 民勤沙区人工梭梭林自然稀疏过程研究. 西北植物学报,2008,28(1):147-154.
- [31] Zheng CL, Wang Q. Water-use response to climate factors at whole tree and bran scale for a dominant desert species in central Asia: *Haloxylon amodendron* [J]. Ecohydrology, 2014,7(1):56-63.
- [32] 齐黎黎. 新疆甘家湖梭梭林国家级自然保护区边缘地带土壤特征研究[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学. 2010.
- [33] 李丹,张勃,戴声佩,等. 民勤绿洲耕地荒漠退耕还林地土壤肥力及物理特性比较研究[J]. 土壤,2011,43(3):398-405.
- [34] 司朗明,刘彤,刘斌,等. 古尔班通古特沙漠西部梭梭种群退化原因的对比分析[J]. 生态学报,2011,31(21):6460-6468.
- [35] 郝建秀. 张掖绿洲及绿洲荒漠过渡带土壤水盐空间异质性研究[D]. 兰州:西北师范大学. 2005.
- [36] 席军强,杨自辉,郭树江,等. 人工梭梭林对沙地土壤理化性质和微生物的影响[J]. 草业学报,2015,24(5):44-52.
- [37] 吉小敏,孙慧瑛,宁虎森,等. 准噶尔盆地西缘天然梭梭林土壤有机碳及养分的分布特征[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(12):148-153.



(上接第 308 页)

- [20] 叶春,李春华,王秋光,等. 大堤型湖滨带生态系统健康状况驱动因素:以太湖为例[J]. 生态学报,2012(12):3681-3690.
- [21] 陈忠升. 塔里木河干流年径流量变化及其人为驱动因素关联分析[J]. 地理科学,2011,12(31):1506-1512.
- [22] Li Z, He Y, Yang X, et al. Changes of the Hailuogou glacier, Mt. Gongga, China, against the background of climate change during the Holocene[J]. Quaternary International, 2010,218(1):166-175.
- [23] 王宁练,张祥松. 近百年来山地冰川波动与气候变化[J]. 冰川冻土,1992,14(3):242-250.
- [24] 张强,韩永翔,宋连春. 全球气候变化及其影响因素研究进展综述[J]. 地球科学进展,2005,20(9):990-998.