

基于 MODIS 的积雪时空变化与 CMADS 气象因子相关性研究 ——以塔什库尔干河流域为例

彭亮¹, 郑淑文¹, 何英¹, 穆振侠¹, 李晓庆^{1,2}

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要: 积雪是塔什库尔干河流域宝贵的资源, 了解流域融雪时空变化规律及其与气象、地形因素的相关关系具有重要意义。基于不同高程带、坡度和坡向的 ArcGIS 解译积雪覆盖数据和 CMADS 数据, 采用方差分析和 Pearson 相关性分析等方法, 研究不同高程带、坡度和坡向雪盖时空变化规律及其与气象因子的相关关系。结果表明: 平均气温、太阳辐射和降水是影响塔什库尔干河流域积雪的主导气象因子, 同时还受地形(高程、坡度、坡向)的限制; 积雪覆盖率在各地形上存在明显季节差异性及月差异性, 积雪覆盖率与气象因子相关度从高到低依次排序为: 平均气温 > 太阳辐射 > 降水 > 风速 > 相对湿度, 积雪覆盖率与前 3 个因素存在显著负相关关系, 风速次之, 与相对湿度的相关性最小。

关键词: 气象因子; 积雪时空变化; Pearson 相关性; MODIS; CMADS

中图分类号: P426.63⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)04-0053-010

Correlation between temporal and spatial changes of snow cover and CMADS meteorological factors based on MODIS:

A case study of Tashkurgan River Basin

PENG Liang¹, ZHENG Shuwen¹, HE Ying¹, MU Zhenxia¹, LI Xiaoqing^{1,2}

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Xinjing Laboratory of Lake Environment & Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, China)

Abstract: Snow accumulation is a valuable resource in the Tashkurgan River Basin. Exploring the temporal and spatial changes of snowmelt in the basin and their correlations with meteorology and topography is conducive to improve the development and utilization of its water resources. This study used ArcGIS based on different elevation zones, slopes and aspect directions to interpret snow cover data and CMADS data, and used analysis of variance and Pearson correlation to study the temporal and spatial variation of different elevation zones, slopes and slope snow cover and their correlation with meteorological factors. The results showed that the average temperature, solar radiation and precipitation are the dominant meteorological factors affecting the snow in the Tashkurgan river basin, which are also limited by the topography (elevation, slope, aspect). Snow cover coverage has obvious seasonal differences and monthly differences in various forms. The correlation between snow coverage and meteorological factors is ranked from high to low: average temperature > solar radiation > precipitation > wind speed > relative humidity. There is a significant negative correlation between snow cover and the first three factors above, followed by wind speed and minimum correlation with relative humidity.

收稿日期: 2018-11-16; 修回日期: 2019-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51569031); 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室基金项目(XJDX0909-2012-02)

作者简介: 彭亮(1978-), 男, 湖北武汉人, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事干旱区水文过程和水资源利用研究。

Key words: meteorological factor; temporal and spatial changes of snow cover; Pearson correlation; MODIS; CMADS(The China meteorological assimilation driving datasets for SWAT model)

1 研究背景

积雪是一种自然循环的资源^[1-2],气象因子是影响积雪水资源最直接的因素。Sharma 等^[3]预测和量化了巴基斯坦杰赫勒姆河流域对气候变化的潜在流量响应,报告了整个西北喜马拉雅地区过去一个世纪的气温趋势($+0.11^{\circ}\text{C}/10\text{a}$),分析了过去 20 年 3 个观测站的区域变暖($+0.7^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)趋势对未来雪盖(积雪覆盖)枯竭和溪流的投射;Chen^[4]发现欧亚雪况对中国动态季节预测有显著影响。当全球气候模型中的欧亚雪况更真实地表现时,夏季气候对中国的可预测性增加;Ageta 等^[5]和 Arora 等^[6]针对喜马拉雅山区的夏季积聚型冰川迅速萎缩和气候变率对其水文响应的影响,发现熔体对温度升高的相关性要大于降雨量。Butt 等^[7]在阿斯托雷河流域,发现相结合的融雪径流模型(SRM)与中分辨率成像光谱仪(MODIS)积雪产品对水资源管理非常有用,可用于巴基斯坦北部印度河流域的径流预报。Zhang 等^[8]利用中国气象同化驱动数据集(CMADS)作为分布式流域水文模型(SWAT)的气象数据,评估了 CMADS + SWAT 模型在高寒地区的适应性;Meng 等^[9-10]发现 CMADS 数据集可以驱动和校准金河流域的 SWAT 模式土地定位工作并且 CMADS 数据模拟径流总量效果较好。

积雪累积消融与气象变化密切相关。很多学者分析内蒙古^[11-12]、青藏高原^[13-15]、新疆^[16-18]等地的积雪与气象的相关关系。李斐等^[19]结合气象因子,分析了高程带积雪面积对气象因素变化的相关性;胡

淑娟等^[20]基于西天山气象因子变化对积雪深度的直接影响程度,研究出气象对积雪深度变化贡献力的不同;刘艳等^[21]发现积雪面积和气温、径流呈线性相关;董安青^[22]基于 DEM 数字高程模型、积雪和气象数据,发现气温、气压、相对湿度均与积雪覆盖有良好相关关系。塔什库尔干河流域常年干旱少雨,故积雪水资源是塔什库尔干河流域经济与农业发展的关键因素。本文基于塔什库尔干河流域 MODIS 积雪数据和 CMADS 气象数据,分析积雪时空变化与气象因子的相关性,对研究变化环境下塔什库尔干河流域冰雪水资源开发利用具有参考意义。

2 研究区概况

塔什库尔干河流域位于北纬 $36^{\circ}43' \sim 38^{\circ}17'$,东经 $74^{\circ}28' \sim 75^{\circ}42'$ 。塔什库尔干河发源于我国新疆维吾尔自治区与阿富汗交界处的克克吐鲁克,流经新疆塔什库尔干县、阿克陶县境内,于阿克陶县 塔尔乡东部的两河口汇入叶尔羌河,多年平均径流量为 $11.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,河道全长 298 km,其中下坂地水利枢纽以下河段长 81 km,天然落差约 1 030 m,河道平均比降 11.3%,海拔范围为 2 974 ~ 7 000 m。塔什库尔干河流域受西风环流作用,属暖温带大陆性气候,干燥少雨,气候呈极端大陆性。流域划分为 3 个自然带:羌塘高山草原地带、阿里山地半荒漠与荒漠地带及昆仑高山荒漠与半荒漠地带,土壤属于南疆极干旱荒漠土,植被极其稀疏,属荒漠带;土壤与植被具有明显垂向分带性^[23]。塔什库尔干河流域呈“靴子状”,具有典型的高寒山区河谷特征,见图 1。

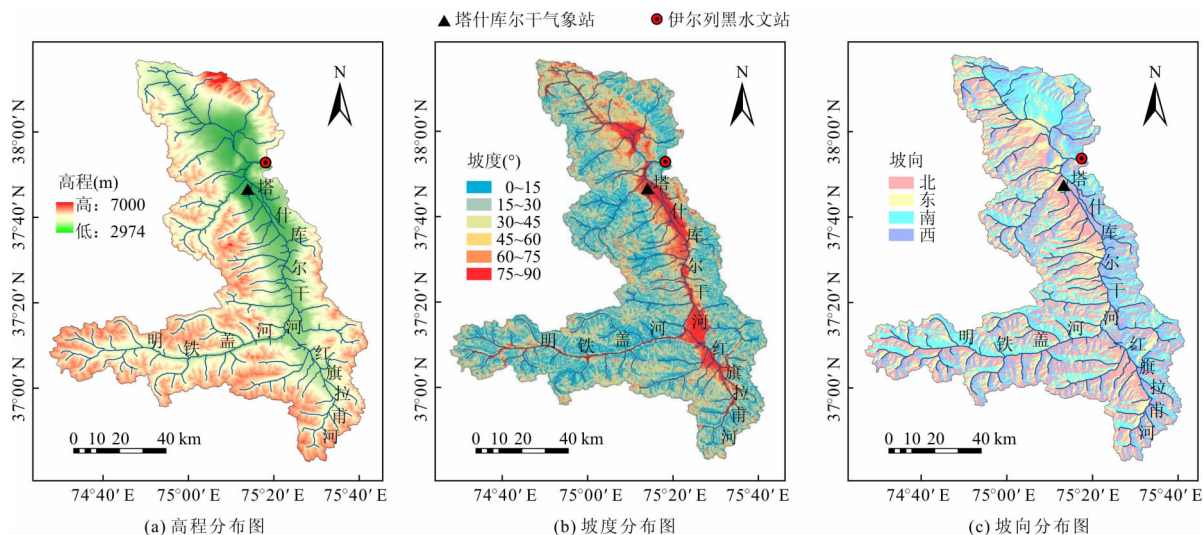


图1 塔什库尔干河流域高程、坡度和坡向分布图

3 数据和方法

3.1 数据来源

3.1.1 数字高程模型和 MODIS 积雪产品数据 在积雪资料来源方面 MODIS 数据^[24-31]有广泛的应用,本文基于研究区 2006-2015 年的 MODIS 积雪影像数据及 DEM 数字高程模型,借助 ArcGIS 软件对数据进行解译,得到流域积雪覆盖情况。

3.1.2 中国气象同化驱动数据集 CMADS (The China meteorological assimilation driving datasets for the SWAT model) 系列数据集引入中国气象局大气同化系统,利用数据模式要素重算、质量控制、循环嵌套、重采样及双线性插值等多种技术手段建立。该数据集引入了中国陆面同化系统,保证了气象输入数据的可靠性。

CMADS 系列的数据来源包括中国 2 421 个国家自动和商业评估中心的近 40 000 个区域加密站,确保了 CMADS 数据集在国内具有广泛的适用性,并且数据准确性得到了极大的提高。CMADS 系列数据集经过了完成和校正。数据使用了中尺度分析系统(LAPS)/时空多尺度分析系统(STMAS)同化方法,进行严格的数据同化并收集了所有相关的

气象数据(例如自动观测站、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、无线电监测与定位(RADAR)等)

本文使用 2008-2015 年 CMADS 逐日气象源数据(平均气温、降水、风速、相对湿度和太阳辐射),塔什库尔干河流域 CMADS 站点分布见表 1,数据参数见表 2。

表 1 塔什库尔干河流域 CMADS 站点分布

CMADS 站点名	纬度 N/(°)	经度 E/(°)	高程/m
148-63	36.78	75.53	5452.00
149-60	37.03	74.78	5233.00
149-61	37.03	75.03	4997.00
149-62	37.03	75.28	4684.00
149-63	37.03	75.53	3898.00
150-61	37.28	75.03	4346.00
150-62	37.28	75.28	5264.00
150-63	37.28	75.53	4524.00
151-61	37.53	75.03	4721.00
151-62	37.53	75.28	4106.00
152-61	37.78	75.03	5228.00
152-62	37.78	75.28	3071.00
153-61	38.03	75.03	3410.00
153-62	38.03	75.28	3962.00

表 2 塔什库尔河流域数据参数

数据	来源	时间序列	分辨率	编码
MODIS	https://reverb.echo.nasa.gov/reverb/	2006-2015	500m×500m	h23v04、h23v05、h24v04、h24v05
DEM	http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp		90m×90m	srtm-51-05、srtm-52-05
CMADS	http://www.cmads.org/	2008-2015	(1/4)°×(1/4)°	CMADS-V1.1-148-63、CMADS-V1.1-149 等 14 个站点

3.2 数据处理及方法

(1) 基于 MRT 批量处理、ArcGIS 软件对 MODIS 积雪数据批处理及对其结果的空间分析,得到积雪覆盖面积数据。

(2) 反距离加权法。由于没有南坡坡向的站点,故使用反距离加权法计算插值的权重,得到南坡坡向的数据,计算方法如公式(1)、(2)。

$$h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \tag{1}$$

式中:(x,y) 为插值点的坐标;(x_i,y_i) 为离散点的坐标。

$$W_i = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-p}} \tag{2}$$

式中:p 为一个任意正实数,通常 p=2;h_i 离散点到插值点的距离;计算得出南坡的权重值为 0.24。

(3) SPSS 软件 Pearson 相关性分析。两个变量之间的皮尔逊相关系数定义为两个变量之间的协方差和标准差的商:

$$\rho_{x,y} = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{E[(x - \mu_x)(y - \mu_y)]}{\sigma_x \sigma_y} \tag{3}$$

公式(3) 定义了总体相关系数,常用希腊小写字母 ρ

作为代表符号。估算样本的协方差和标准差,可得到皮尔逊相关系数,常用英文小写字母 r 表示:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

亦可由 (x_i, y_i) 样本点的标准分数均值估计,得到与公式(4)等价的表达式:

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x} \right) \left(\frac{y_i - \bar{y}}{\sigma_y} \right) \quad (5)$$

式中: $\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x}$ 、 $\frac{y_i - \bar{y}}{\sigma_y}$ 及 σ_x 分别为 x_i 样本的标准分数、样本平均值和样本标准差。

4 不同高程带、坡度、坡向的积雪覆盖率与各气象因子的相关分析

塔什库尔干河流域积雪覆盖主要受气象和地形因子影响,积雪与气温、太阳辐射等气象因素直接相关。基于不同高程带、坡度和坡向的气象因素对研究区积雪覆盖率(snow cover fraction, SCF)的影响,对塔什库尔干河流域 2006–2015 年各期 MOD10A2 的积雪数据和 2008–2015 年的 CMADS 数据进行逐月统计。

4.1 不同高程带的积雪与气象因子相关分析

塔什库尔干河伊列列黑水文站高程为 2 974 m,研究区高程范围为 2 974~7 000 m。本文根据积雪覆盖调查将流域分成 4 个高程带(A 区、B 区、C 区、D 区),即:2 974~3 600 m,3 600~4 200 m,4 200~4 800 m 和 4 800~7 000 m,对各高程带 SCF 对气象的响应性进行相关分析,见图 2。

流域的积雪变化:4 个高程带 SCF 变化趋势存在差异性,各高程带 SCF 下降时段发生在 2–6 月,全流域积雪覆盖比率上升时期基本在 10—次年 1 月,积雪开始进入积累期;A 区和 B 区的 SCF 均在夏季(7–9 月)降低至最低值;高海拔、气温低的 D 区,满足常年冰川和积雪的持续发育条件,积雪和冰川持续时间变长,故 SCF 的变化呈平稳状态。A 区海拔最低,高气温、多降水等气象特征对积雪的消融累积影响较大,故其 3–12 月 SCF 均低于 3%,1–2 月 SCF 略有增大,值分别为 5.52% 和 7.95%。

平均气温:结合各高程带的积雪率,分析其与平均气温的相关程度,可以看出 SCF 对平均气温具有很好的响应,除了高海拔的 D 区,其他高程带的 SCF 随气温的升高与降低表现出减小和增大趋势。各高

程带的平均气温变化趋势大致相同,其平均气温均在 8 月达到最高,SCF 呈相反规律,在气温最高的 8 月由于积雪消融量变大,故其值呈现出最小状态;最高气温出现在低海拔 A 区,且 SCF 与平均气温呈现出极好的负相关关系。

最低平均气温变化趋势线位于 D 区,最低气温在 1 月(−19.80℃)。高海拔 D 区的平均气温均在 5℃ 以下,除了夏季气温超过 0℃,其他季节均在 0℃ 以下,不满足积雪的融化条件,虽然积雪面积分布少,但消融变化幅度较小。

降水量:降水量对塔什库尔干河流域不同高程带积雪年内变化影响较复杂。A 区 SCF 和降水量在 1–2 月呈相反变化趋势,降水的年内变化起伏较大,SCF 在 3–12 月呈平稳状态;B 区降水量变化有两个时段呈增加趋势,分别是 2–6 月和 7–8 月,其他月份均是减少趋势;C 区的 SCF 呈“N”型趋势,降水量表现为“M”型,两者存在同步性和差异性;D 区为高海拔区域,存在一定量的固态降水,因气温低、区域面积小,其 SCF 小且变化微弱,而降水量在 1–8 月呈明显增长趋势,直到 12 月呈下降规律,总体为“∩”型。塔什库尔干河发源于高山冰川及多年积雪区,降水量多时则气温低、融冰雪较少;反之降水量少时则气温高、融冰雪较多,降水与气温对冰雪消融起到互补作用。

风速:风速在不同高程带的变化规律相似,总体趋势表现为“增–减–增”,且起伏区间小,在 1.8~2.5 m/s 范围上下浮动,但各高程带的 SCF 的趋势明显不同,初步认为风速对不同高程带 SCF 影响不大。但是 C 区 SCF 的浮动较明显,与风速的规律同步性强,表现了极好的正相关性。

相对湿度:塔什库尔干河流域不同高程带的年均相对湿度起伏变化相似,“W”型曲线波动显著,4–10 月的 A、B 和 C 区 SCF 与相对湿度同步,呈现出弱正相关关系。初步认为相对湿度达到某一定值时,对积雪覆盖面积有正相关影响;当海拔过高时,由于温度低,即使相对湿度满足降水条件,对积雪覆盖面积的改变也不大,而降水对积雪厚度的影响更剧烈。

太阳辐射:太阳辐射在塔什库尔干河流域的变化呈“∩”型。其变化趋势类似于平均气温,故其与 SCF 的相关性也与平均气温相似。太阳辐射作为地表温度的主要影响因素之一,随着近地层空气对太阳长短波辐射的吸收增加,气温呈增加趋势,7 月温度最高,1 月温度最低。初步认为,SCF 和太阳辐射有一定的相关性。高程不变的情况下,太阳辐射量

越大,温度随之增高,加快积雪与冰川的融化速度,故积雪消融量逐渐增涨。

4.2 不同坡度上的积雪与气象因子相关分析

由于塔什库尔干河流域坡度均小于 75° ,且 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 和 $60^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 两个坡度带所占区域比例及其积

雪覆盖面积较小,将这两个坡度带合并为一个坡度带($45^{\circ} \sim 75^{\circ}$),故本文将研究区分成4个坡度带 $S_1(0^{\circ} \sim 15^{\circ})$, $S_2(15^{\circ} \sim 30^{\circ})$, $S_3(30^{\circ} \sim 45^{\circ})$, $S_4(45^{\circ} \sim 75^{\circ})$ 。基于流域CMADS月气象因子与积雪覆盖面积数据,绘制SCF和气象因子变化图,见图3。

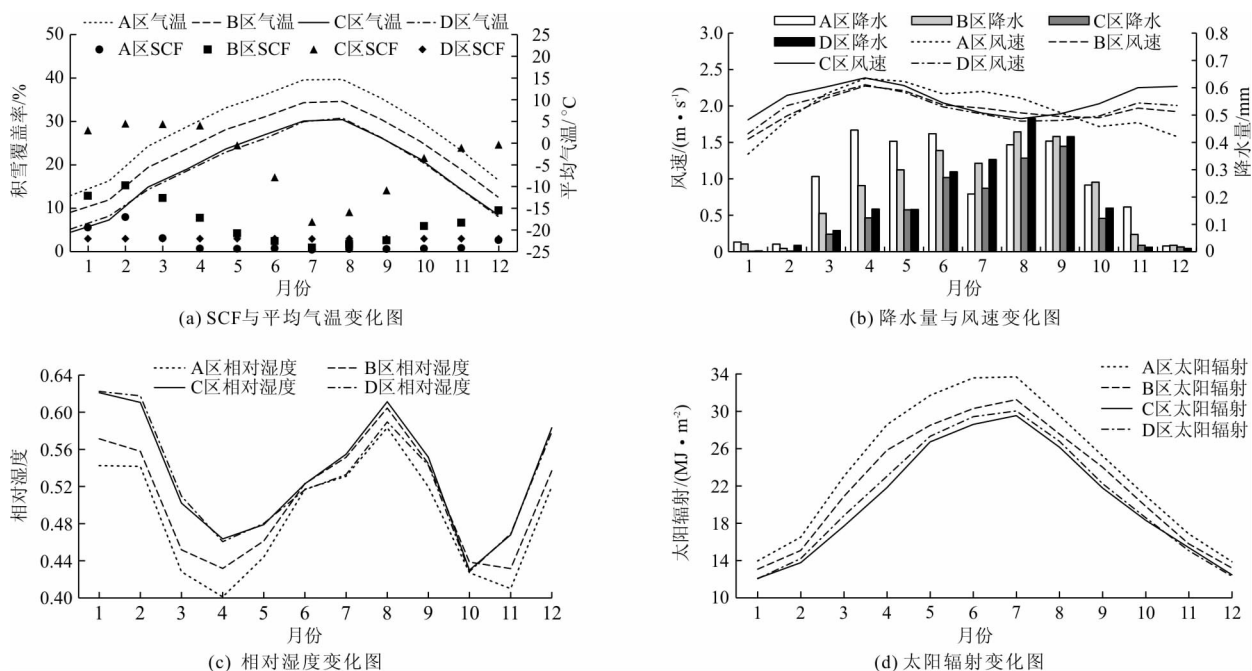


图2 全年不同高程带SCF和各气象因子的变化图

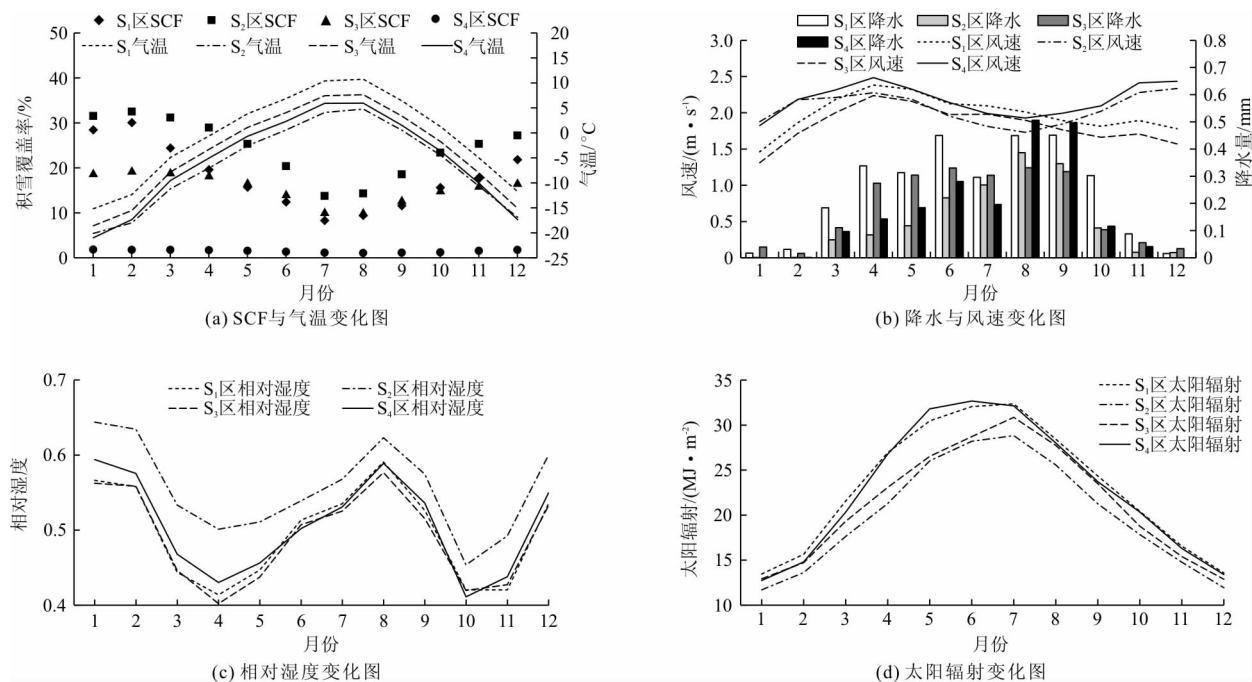


图3 全年不同坡度带SCF和各气象因子的变化图

各坡度带的积雪覆盖:小于 45° 的3个坡度带SCF变化规律一致,即:存在两个上升期和一个下降期,1-2月为第一个上升期,8-12月为第二个上升

期,3-7月为下降期;在 S_2, S_3 和 S_4 区域SCF随着坡度增加而不断降低,由于坡度变大,海拔升高,坡度带所占研究区比例逐步减小,积雪覆盖面积呈不

断缩减趋势,促使此坡度带的 SCF 下降。在 S_1 区域,由于海拔低,太阳直射面积大,故积雪消融量增加,其 SCF 降低。 S_1 、 S_2 和 S_3 坡度带 SCF 在 3-7 月不断下降,8-次年 2 月持续增加。

平均气温:整体而言,SCF 与平均气温呈负相关关系。坡度小于 45° 时,SCF 对平均气温呈现出很好的响应,随着平均气温升高,SCF 表现出减小趋势; S_3 、 S_4 区域气温低于 S_1 却高于 S_2 ,说明当塔什库尔干河流域坡度大于 30° 时,大部分区域位于高海拔地区,故可能存在逆温层,由于气候和地形条件影响,有时会出现气温随高度增加而升高的现象,随着坡度的增加,海拔高度可能越高。

降水量:降水量的趋势曲线起伏变化复杂,与 SCF 无明显相关关系。说明降水对积雪的影响微弱,王明祖^[32]研究得出降水对积雪深度、积雪日数有明显相关关系,与积雪覆盖面积的关系相对较小,与本文分析结果相一致。

风速: S_1 和 S_3 全年风速变化曲线呈“Λ”型,总体为先增后减的规律,同坡度带的 SCF 变化规律虽然呈现出“N”,但两者的增幅区间差异性太大,相似性很小; S_2 、 S_4 坡度带为“N”型,表现为“增减增”的趋势,可以看出各坡度带之间存在相似性与差异性,相似性发生在 1-8 月。 S_2 坡度带 SCF 与风速除了在 2-4 月存在差异性外,其他时段均表现出很好的同步性,说明此坡度带的 SCF 对风速有响应性。总体而言,塔什库尔干河流域风速与 SCF 呈现出微弱相关关系。

相对湿度:小于 45° 坡度的塔什库尔干河流域与相对湿度在短时段具有很好的相关性。在 4-10 月,相对湿度呈现“增加-减少”的趋势,同期 SCF 表现为“减少-增加”状态,初步说明在坡度小于 45° 及 4-10 月时段,SCF 随着相对湿度增加而减少,两者呈现良好的负相关。其他时段相对湿度与 SCF 为正相关关系,即 SCF 随相对湿度的增加表现为增加趋势,反之减少;

太阳辐射:坡度小于 45° 时,太阳辐射与 SCF 呈负相关,即 SCF 随太阳辐射的增加而降低,积雪加速消融。太阳辐射呈“单峰”型,峰值出现在 7 月;坡度最低的 S_1 坡度带太阳辐射最大, S_4 坡度带次之,由于低坡度研究区范围海拔较低,占地面积大,气温高,而高坡度区域极大可能位于高海拔地区,无山体遮蔽,太阳直射此区域,且日照时数长,故这两个坡度带的太阳辐射相对较大。

4.3 不同坡向上的积雪与气象因子相关分析

利用 ArcGIS 将塔什库尔干河流域重分类为 4 个坡向,即:东坡、南坡、西坡和北坡。对解译的积雪覆盖面积进行数据统计整理,与 CMADS 气象数据进行相关结果分析。基于塔什库尔干河流域 ArcGIS 解译的不同坡向上的 SCF 数据和 CMADS 气象数据,绘制不同坡向的 SCF、各气象因子的相关变化图,见图 4。

坡向 SCF:可以看出各坡向的 SCF 增长幅度及变化规律较为一致,2-7 月为 SCF 下降期,7 月达到最低值,在这一时段积雪开始进行消融;8-次年 1 月 SCF 不断增长,此时积雪进入累积期与维持期;阴坡北坡 SCF 最大,太阳辐射小、日照时数短,造成气温的差异而影响到积雪的变化。其他三个坡向的 SCF 值比较相近,但南坡的 SCF 高于东坡和西坡;阳面南坡虽然太阳照射时间长,但是由于西风环流,带来大量水汽易形成降雪,从而间接增加了积雪覆盖面积,故南坡的 SCF 不是最低。西坡的 SCF 在全流域是最低状态。

平均气温:坡向平均气温表现出与 SCF 截然相反的趋势,2-7 月为增长期,8-12 月为下降期,表达出显著负相关性。各坡向 SCF 随平均气温的升高而减小。北坡平均气温在全流域属于低值区,1 月气温最低(-19.79°C),故其 SCF 最高;南坡平均气温为高值区,气温最高 7 月(20.15°C),但其 SCF 不是最小;平均气温从高到低依次为:南坡、西坡、东坡和北坡,SCF 从小到大依次为:西坡、东坡、南坡和北坡,说明气温只是影响积雪消融累积的重要气象因素之一,还有其他因素与积雪覆盖面积的变化有直接联系。

降水量:在 11-次年 2 月的降水量最少,SCF 最大,原因是:气温低,水汽难以上升冷凝并降落至地面,造成积雪的累积,积雪面积不断增加。北坡的 SCF 变化趋势表现出与降水量相反,说明北坡的 SCF 对降水量有弱敏感性。各坡向的降水量变化差异性大,但 SCF 趋势相似性强,反映出降水量与 SCF 相关性微弱,坡向不变时,SCF 随降水量的变化无明显变化趋势。

风速:最小的风速在北坡,研究区 SCF 最大趋势线也是在北坡,在 4-12 月期间两者变化规律一致,呈现出先增大后减小的同步性。南坡的风速相对最大,最小值出现在 1 月(1.47 m/s)和 12 月(1.71 m/s);1-5 月为上升期,5 月达到最大风速(3.15 m/s),到 6 月份时风速微弱下降,7-12 月是下降期;西坡、东坡和北坡风速波动周期相同,1-4 月风速不断增大,直到 12 月风速持续减小,但西坡和东坡的同时段 SCF 对风速的

响应性很微弱,认为西坡和东坡的SCF与其风速无明显相关关系。

相对湿度:4个坡向的相对湿度变化规律相近,波动周期一致,存在两个下降期(1-4月和8-11月)和两个上升期(4-8月和11-12月)。相对湿度从大到小依次是:南坡、北坡、西坡和东坡。东坡的相对湿度最小(0.40);北坡SCF最大,而其相对湿度值在整个塔什库尔干河流域为第二;南坡SCF仅次于北坡,但其相对湿度值却最大(0.72),说明相对湿度对积雪的消融有微弱的抑制作用。无降雪期(4-11月),降雪对相对湿度的响应性较好,呈明显负相关性。

太阳辐射:辐射量的大小随太阳高度变化而变

化,加之山区地形起伏大,不同坡向接受的太阳辐射量存在差异性,造成积雪消融规律的差异性和复杂性。整个流域的太阳辐射起伏具有相同特性特征,均为单峰型,北坡1月达到最小值(12.00 MJ/m^2);南北坡的7月均达到最大值(分别为 41.86 MJ/m^2 和 30.08 MJ/m^2)。总体而言,SCF和太阳辐射呈负相关关系,即SCF随太阳辐射的增大而减小。阳面与阴面的SCF存在差异是由于阳面地表反照率小,会吸收很多太阳辐射,气温也会升高,引起冰雪的消融变化;与此同时由于阴面积雪覆盖,使地表反照率增加,地表等下垫面减小了对太阳辐射的吸收,气温会降低,而引起积雪融化速度降低。

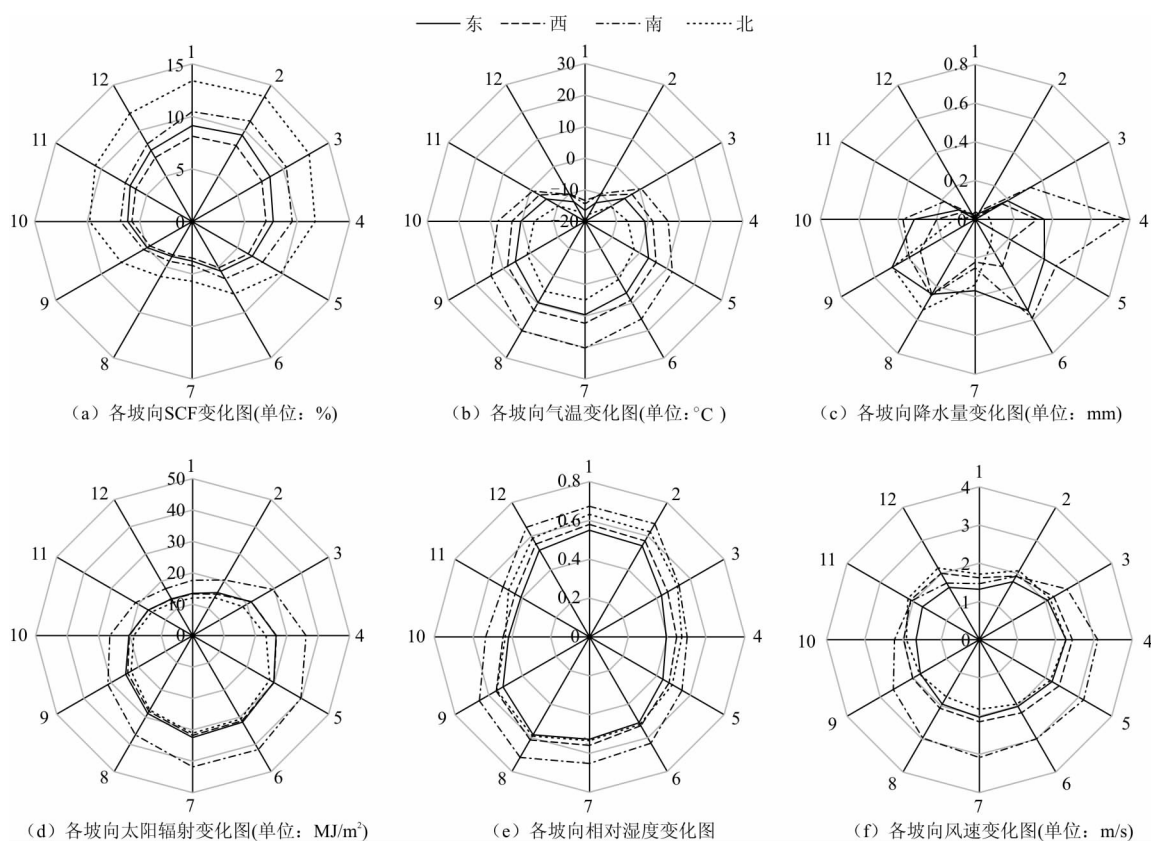


图4 全年不同月份各坡向SCF与各气象因子的相关变化图

5 Pearson相关性分析

基于不同高程带、坡度和坡向的气象因子数据与SCF,利用SPSS软件做Pearson相关性分析,见表3、4、5。Pearson相关参数指标:当 $0.8 < |r| \leq 1.0$ 时,两因素高度相关; $0.5 < |r| \leq 0.8$ 时,中度相关; $0.3 < |r| \leq 0.5$ 时,低度相关;当 $0 \leq |r| \leq 0.3$,表示因素之间相关程度很弱,基本上不相关。

由表3可知,平均气温与B区SCF的Pearson相关性 r 值为 -0.926 ,说明这两个因素的负相关性高;与

A、C和D区3个高程带的积雪覆盖率的Pearson相关性 r 值分别为 -0.790 、 -0.818 和 -0.551 ,呈中度相关;但D区的Sig值没有通过相关性检验,说明其负相关性不显著,其他为显著负相关。降水、太阳辐射与各高程带积雪的相关性研究结果与平均气温类似。说明平均气温、降水和太阳辐射这3个因素是影响积雪消融、维持和累积的主要气象因子。

风速与C区SCF呈中度显著正相关,其Pearson相关 r 值和Sig值分别为 0.654 和 0.021 ;与A区SCF相关性为中度,不显著;其他高程带的积雪与风

速相关性 r 值均小于 0.38, 分别为 0.378 和 -0.241, 相关性较弱且不显著。

相对湿度与 A 区的 SCF 呈低度正相关, 其 Pearson 相关 r 值和 Sig 值分别为 0.321 和 0.309; 与其他高程带的积雪均呈负相关, r 值分别为 -0.083、-0.198 和 -0.065, 说明塔什库尔干河流域的 SCF 与相对湿度基本上不相关。

总体而言, 与高程带的 SCF 相关性程度从高到低依次排列为: 平均气温 > 降水量 > 太阳辐射 > 风速 > 相对湿度。

从表 4 可以发现, 不同坡度积雪与气象因子的相关性从高到低依次排列为: 平均气温 > 太阳辐射 > 降水量 > 风速 > 相对湿度。

平均气温、太阳辐射与每个坡度带 SCF 的 Pearson 相关性均表现为高度显著负相关, 且通过了 0.05 级别双尾检验; 降水量与 S_1 坡度带 SCF 呈中度相关, 且相关性不显著; S_2 、 S_3 和 S_4 坡度带 SCF 与降水量的相关性分别为高度、中度显著负相关, 体现出

相关性强的特性。

在全流域 S_2 和 S_4 坡度带 SCF 与风速的相关性最高, 呈中度相关, r 值分别为 0.701 和 0.521, Sig 值分别为 0.011 (显著) 和 0.082 (不显著); 风速与 S_1 、 S_2 区域相关性均很弱。相对湿度与每个坡度带 SCF 的相关系数最小, 但同时也对塔什库尔干河流域的积雪水资源起到一定的贡献价值。

从表 5 可以发现, 平均气温与每个坡向的 SCF 的 Pearson 相关性均为高度显著负相关, 太阳辐射与每个坡向 SCF 的 Pearson 相关性均为中度显著负相关, 均通过了显著性检验; 降水量与南坡 SCF 的 Pearson 相关 r 值为 -0.305 (低度相关), 未通过显著性检验, 降水量与东坡、西坡、北坡积雪的相关系数为 -0.773、-0.729、-0.844, 可以看出降水量对积雪消融累积的贡献较大。风速、相对湿度与每个坡向 SCF 的相关性均很弱。总体而言, 不同坡向 SCF 与气象因子的相关性从高到低依次排列为: 平均气温 > 太阳辐射 > 降水量 > 相对湿度 > 风速。

表 3 不同高程带的积雪覆盖率 - 气象因子 Pearson 相关参数

高程带	相关参数	平均气温	降水量	风速	太阳辐射	相对湿度
A	Pearson 相关性	-0.790 **	-0.718 **	-0.517	-0.644 *	0.321
	显著性(双尾)	0.002	0.009	0.085	0.024	0.309
B	Pearson 相关性	-0.926 **	-0.871 **	-0.241	-0.793 **	-0.083
	显著性(双尾)	0.000	0.000	0.450	0.002	0.797
C	Pearson 相关性	-0.818 **	-0.816 **	0.654 *	-0.702 *	-0.198
	显著性(双尾)	0.001	0.001	0.021	0.011	0.537
D	Pearson 相关性	-0.551	-0.503	0.378	-0.449	-0.065
	显著性(双尾)	0.063	0.095	0.226	0.143	0.842

注: ** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著; * 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

表 4 不同坡度的积雪覆盖率 - 气象因子 Pearson 相关参数

坡度带	相关参数	平均气温	降水量	风速	太阳辐射	相对湿度
S_1	Pearson 相关性	-0.943 **	-0.537	-0.422	-0.772 **	-0.113
	显著性(双尾)	0.000	0.072	0.171	0.003	0.726
S_2	Pearson 相关性	-0.898 **	-0.899 **	0.701 *	-0.748 **	0.014
	显著性(双尾)	0.000	0.000	0.011	0.005	0.967
S_3	Pearson 相关性	-0.824 **	-0.664 *	-0.164	-0.709 **	-0.320
	显著性(双尾)	0.001	0.019	0.611	0.010	0.310
S_4	Pearson 相关性	-0.865 **	-0.794 **	0.521	-0.606 *	-0.008
	显著性(双尾)	0.000	0.002	0.082	0.037	0.980

注: ** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著; * 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

表 5 不同坡向的积雪-气象因子 Pearson 相关参数

坡向	相关参数	平均气温	降水	风速	太阳辐射	相对湿度
东	Pearson 相关性	-0.917 **	-0.773 **	-0.320	-0.737 **	-0.206
	显著性(双尾)	0.000	0.003	0.310	0.006	0.520
西	Pearson 相关性	-0.910 **	-0.729 **	-0.225	-0.709 **	-0.224
	显著性(双尾)	0.000	0.007	0.483	0.010	0.483
南	Pearson 相关性	-0.846 **	-0.305	-0.520	-0.588 *	-0.264
	显著性(双尾)	0.001	0.335	0.083	0.044	0.408
北	Pearson 相关性	-0.941 **	-0.844 **	0.514	-0.809 **	0.226
	显著性(双尾)	0.000	0.001	0.087	0.001	0.480

注:**表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著;*表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

6 结 论

积雪是塔什库尔干河流域宝贵的资源,年内积雪覆盖率在不同高程带、坡度和坡向上与气象因子存在一定的相关关系,研究表明:

(1)影响塔什库尔干河流域积雪的主导气象因子有 3 个:平均气温、太阳辐射和降水量,同时受地形(高程、坡度、坡向)的限制。从积雪覆盖率对气象因子的响应、Pearson 相关系数及显著性检验发现,在不同地形上,平均气温、太阳辐射和降水量对积雪覆盖率时空变化影响强度最大。

(2)季节差异性及月差异性明显,全流域在地形及气象因素的影响下,春冬季节(12-次年 5 月)SCF 最大,其中包括:高程带 4 200~4 800 m、15°~30°和北坡;夏季和秋季(6-11 月)最小,包含:高程带 2 974~3 600 m、45°~75°和西坡。

(3)在不同地形上的年内积雪覆盖率与气象因子的相关程度存在复杂性和相似性,研究发现,各高程带、坡度、坡向积雪覆盖率与各气象因子的相关程度相似性较高,依次排序总结为:平均气温>太阳辐射>降水量>风速>相对湿度,积雪覆盖率与前 3 个因素存在显著负相关关系,风速次之,与相对湿度的相关性最小。

参考文献:

[1] OKI, T. Global hydrological cycles and world water resources[J]. Science, 2006, 313(5790):1068-1072.
[2] ALLEN M R, INGRAM W J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle[J]. Nature, 2012, 419(6903):224-232.
[3] SHARAM V, MISHRA V D, JOSHI P K. Implications of climate change on streamflow of a snow-fed river system of the Northwest Himalaya[J]. Journal of Mountain Sci-

ence, 2013, 10(4):574-587.
[4] CHEN Hong. Assessing the impacts of eurasian snow conditions on climate predictability with a global climate model [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2010, 3(6):336-341.
[5] AGETA Y, NAITO N, NAKAWO M, et al. Study project on the recent rapid shrinkage of summer-accumulation type glaciers in the Himalayas, 1997-1999[J]. Bulletin of Glaciological Research, 2001, 18:45-49.
[6] ARORA M, SINGH P, GOEL N K, et al. Climate variability influences on hydrological responses of a large himalayan basin[J]. Water Resources Management, 2008, 22(10):1461-1475.
[7] BUTT M J, BILAL M. Application of snowmelt runoff model for water resource management [J]. Hydrological Processes, 2011, 25(24):3735-3747.
[8] ZHANG Limin, WANG Hao, MENG Xianyong. Application of SWAT model driven by CMADS in Hunhe River Basin in Liaoning Province[J]. Journal of North China University of Water Resources & Electric Power, 2017,385:1-9.
[9] MENG Xianyong, WANG Hao, et al. Significance of the China meteorological assimilation driving datasets for the SWAT Model (CMADS) of East Asia[J]. Water, 2017, 9(10):765-769.
[10] MENG Xianyong, SHI Chunxiang, LIU Shiyin, et al. CMADS Datasets and its application in watershed hydrological simulation:A case study of the Heihe River Basin [J]. Pearl River, 2016.37(7):1-19.
[11] 王国强. 内蒙古草原区积雪资源时空分布及影响因子研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2011.
[12] 孙晓瑞, 高永, 丁延龙,等. 内蒙古积雪时空分布特征及其与气候因子的相关性[J]. 内蒙古林业科技, 2017, 43(2):10-15.
[13] 王叶堂, 何勇, 侯书贵. 2000-2005 年青藏高原积雪时空变化分析[J]. 冰川冻土, 2007, 29(6):855-861.

- [14] 朱正, 刘宝康, 冯蜀青, 等. 基于 SSM/I 的青藏高原东部雪深模型反演及积雪时空分布研究[J]. 草业科学, 2009, 26(8): 40-46.
- [15] 史建桥. 基于遥感和 GIS 的青藏高原积雪时空变化及影响因子分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [16] 侯小刚, 李帅, 张旭, 等. 基于 MODIS 积雪产品的中国天山山区积雪时空分布特征研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(3): 9-16.
- [17] 王宏伟, 张璞. 北疆地区积雪时空变化的影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 508-516.
- [18] 黄慰军, 黄镇, 崔彩霞, 等. 新疆雪密度时空分布及其影响特征研究[C]// 中国气象学会 2007 年年会气候变化分会场论文集, 2007: 66-72.
- [19] 李斐, 刘苗苗, 王水献. 2001-2013 年开都河流域上游积雪时空分布特征及其对气象因子的响应[J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1160-1168.
- [20] 胡淑娟, 雷晓云, 邢坤, 等. 西天山气象因子对融雪期积雪深度影响通径分析[J]. 气象与环境科学, 2017(3): 36-40.
- [21] 刘艳, 李杨, 张璞. 玛纳斯河流域融雪径流与积雪-气象因子分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17(2): 145-149.
- [22] 董安青. 基于遥感方法的新疆积雪覆盖与气象因子的相关性研究[D]. 新疆师范大学, 2009.
- [23] 郑度, 张百平. 喀喇昆仑山-西昆仑山地区的垂直自然带、环境和自然保护问题[J]. 自然资源学报, 1989, 4(3): 254-266.
- [24] 王福勇. 基于 MODIS 遥感影像的融雪径流模拟研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(4): 26-29.
- [25] 唐志光, 王建, 彦立利, 等. 基于 MODIS 的青藏高原亚像元积雪覆盖反演[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(11): 33-38.
- [26] 鲍伟佳, 刘时银, 吴坤鹏, 等. 一种基于 MODIS 积雪产品的雪线高度提取方法[J]. 冰川冻土, 2017, 39(2): 259-272.
- [27] 颜伟, 刘景时, 罗光明, 等. 基于 MODIS 数据的 2000-2013 年西昆仑山玉龙喀什河流域积雪面积变化[J]. 地理科学进展, 2014, 33(3): 315-325.
- [28] 周婷婷, 陈文惠. 基于 MODIS 数据和气象观测数据的气温空间插值方法比较[J]. 地理科学进展, 2011, 30(9): 1143-1151.
- [29] 林金堂, 冯学智, 肖鹏峰, 等. 基于 MODIS 数据的玛纳斯河山区雪盖年际波动特征研究[J]. 干旱区地理(汉文版), 2011, 34(6): 975-982.
- [30] 邱玲花, 彭定志, 胡林涓, 等. 基于 MODIS 和 SRM 的拉萨河流域融雪径流模拟研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(2): 152-156.
- [31] 蒋耿明. MODIS 数据基础处理方法研究和软件实现[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2003.
- [32] 王明祖. 青藏高原近 15 年积雪时空变化及其与气候因子关系研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.

(上接第 52 页)

- [9] 杨琳琳, 李波, 付奇. 基于 BP 神经网络模型的新疆水资源承载力情景分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(2): 216-222.
- [10] 车娅丽, 徐慧, 龚李莉, 等. 基于 PSR 模型和主成分分析法的节水型社会建设评价[J]. 水电能源科学, 2014, 32(7): 124-127.
- [11] 曲衍波, 朱伟亚, 鄢文聚, 等. 基于压力-状态-响应模型的土地整治空间格局及障碍诊断[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 241-249.
- [12] 王国重, 李中原, 张继宇, 等. 基于压力-状态-响应模型的河南省水库生态安全评估[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4): 12-17.
- [13] 刘畅, 冯宝平, 张展羽, 等. 基于压力-状态-响应的熵权-物元水生态文明评价模型[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 1-7.
- [14] 皮家骏, 欧阳澍, 张带琴, 等. 基于 PSR-物元模型的水生态文明评价研究——以南昌市为例[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 55-61.
- [15] 刘燕, 张江山. 基于熵权的 TOPSIS 法在水环境质量评价中的应用[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2010, 26(5): 109-114.
- [16] 赵丹, 刘东, 武秋晨. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的区域农业水资源系统恢复力评价[J]. 中国农村水利水电, 2014(7): 52-56.
- [17] 杨建仁, 刘卫东. 基于灰色关联分析和层次分析法的新型工业化水平综合评价——以中部六省为例[J]. 数学的实践与认识, 2011, 41(2): 122-132.
- [18] 李庆胜, 刘思峰. 灰色犹豫模糊集及其灰关联 TOPSIS 决策方法[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2015, 29(6): 597-601+606.
- [19] 戴明宏, 王腊春, 魏兴萍. 基于熵权的模糊综合评价模型的广西水资源承载力空间分异研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 193-199.
- [20] 管新建, 梁胜行. 基于熵权模型的黄河流域水资源利用效率综合评价[J]. 中国农村水利水电, 2016(11): 82-85.