

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0046

汤瑞, 穆振侠, 肉孜买买提·阿不来提, 等. 基于不同方法天山西部山区雪线的确定及其变化规律分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 108-114. ANG R, MU Z X, ROUZIMAMAT A, et al. Confirmation of snow line in Western Tianshan Mountains based on different methods and analysis of its change rule[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 108-114. (in Chinese)

# 基于不同方法天山西部山区雪线的确定及其变化规律分析

汤瑞<sup>1</sup>, 穆振侠<sup>1</sup>, 肉孜买买提·阿不来提<sup>2</sup>, 周育琳<sup>1</sup>, 彭亮<sup>1</sup>

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆伊犁水文勘测局, 新疆伊犁 835000)

**摘要:** 为了更好的指导天山西部山区冰雪水资源的开发利用, 对其雪线变化规律的研究有至关重要的作用。借助2000-2016年MODIS数据、DEM数据以及1959-2015年气象数据, 采用遥感监测雪线法、气候雪线法、雪线场法, 对喀什河流域雪线时空变化规律进行分析研究, 结果表明: (1) 基于遥感监测雪线法可以看出, 研究区多年平均8日、年均雪线均呈上升趋势; 在季节尺度上, 春季和冬季雪线呈上升趋势, 秋季和夏季雪线呈下降趋势; 结合气候数据可知, 年均雪线对降水有较好响应, 春季雪线对气温有较好响应; (2) 基于气候雪线法可以看出, 气候雪线要高于遥感监测雪线, 仅从气候角度分析, 气候变化导致雪线逐年呈上升趋势; (3) 采用雪线场分析可看出, 雪线场的雪线分布主要受地形影响, 以2000 m高度为界限, 其上下两部分雪线场对降水有不同的响应。

**关键词:** MODIS; 气候雪线; 雪线场; 时空变化; 气候响应

**中图分类号:** P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)02-0108-07

## Confirmation of snowline in Western Tianshan Mountains based on different methods and analysis of its change rule

TANG Rui<sup>1</sup>, MU Zhenxia<sup>1</sup>, ROUZIMAMAT Abulaiti<sup>2</sup>, ZHOU Yulin<sup>1</sup>, PENG Liang<sup>1</sup>

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

2. Xinjiang Yili Hydrographic Survey Bureau, Yili 835000, China)

**Abstract:** In order to better guide the development and utilization of ice and snow resources in western Tianshan mountains, it is of great importance to study the law of snowline change. With the help of the MODIS data from 2000 to 2016, the weather data from 1959 to 2015, and the DEM data, we studied the temporal and spatial variation of the snowline in Kashi river basin using the remote sensing snowline method, the climate snowline method, and the fields of snowline altitude method. The results are as follows: (1) According to the remote sensing snowline method, the multi year average (8 days) and the annual average snowline showed a rising tendency in the research area; on the seasonal scale, the snowline showed a rising tendency in spring and winter, and showed a declining tendency in autumn and summer. Based on the climatic data, the annual average snowline had a good response to precipitation, and the spring snowline had a good response to temperature. (2) According to the climate snowline method, the climate snowline was higher than the remote sensing snowline. From the climate perspective, the climate change caused the snowline to increase year by year. (3) It is shown from the analysis of the fields of snowline altitude that the distribution of the snowline is mainly influenced by topography. With the 2000 m height as the dividing line, the two parts of the fields of snowline altitude have different responses to precipitation.

**Key words:** MODIS; climate snowline; fields of snowline altitude; temporal and spatial variation; climate response

收稿日期: 2017-07-20 修回日期: 2017-10-13 网络出版时间: 2018-01-09  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180109.1102.006.html>  
基金项目: 国家自然科学基金(51469034; 51209181; 51569031)

**Funds:** National Natural Science Foundation of China(51469034; 51209181; 51569031)

**作者简介:** 汤瑞(1996), 男, 安徽合肥人, 主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail: tary\_studio@163.com

**通讯作者:** 穆振侠(1980), 男, 山东莒县人, 副教授, 主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail: muzhenxia@126.com

雪线作为冰冻圈内对气候最为敏感的要害之一<sup>[1-3]</sup>,其变化波动直接反映着气候的变迁<sup>[4-6]</sup>,长时间序列的雪线也反映着冰川的消融和累积。雪线作为积雪覆盖区和无雪区的交界线<sup>[6]</sup>,也同时反映着积雪面积的变化。而随着全球气候变暖,各高海拔山脉的积雪呈现出不同趋势的减少,对区域水循环产生了极大的影响,所以动态的雪线监测对水资源利用保护和水库的合理调洪调度可起到关键作用。特别在新疆这个气候干燥,年内温差较大,降雨少、蒸发强烈的地区,雪线的研究对社会经济发展和自然环境保护有着更为重要的意义。近些年由于人类活动影响,气候变化剧烈,雪线这一极为敏感的气候产物的研究得到许多学者们关注。目前雪线的研究包含了全球绝大数主要山脉及高原,研究主要发现,雪线不同的时空变化受山体基面<sup>[7]</sup>、经度、纬度、气温、降水及下垫面等因素的影响。

雪线的监测主要有两种途径:一是由雪线所在位置的气象要素建立经验公式推导雪线高度<sup>[8]</sup>,或是利用野外数据采集提取雪线高度<sup>[10]</sup>。二是利用遥感影像结合地理信息系统提取雪线高度<sup>[11-12]</sup>,随着遥感技术的发展,在地面观测站稀少的地区应用气象卫星进行积雪研究得到广泛关注<sup>[12]</sup>,国内外学者基于 MODIS 卫星、HJ-1/CCD 卫星和 Landsat 卫星等光学遥感对粒雪线高度进行提取<sup>[13-19]</sup>,也有基于 SAR 等微波遥感对雪线高度进行提取<sup>[12,20]</sup>。在我国西北地区地广人稀,地面监测站网密度极为稀疏,并且国内利用遥感卫星的雪线研究大部分集中在青藏高原地区<sup>[21]</sup>,新疆地区内的研究还较为稀少,其中研究大多使用单一的方法对雪线高度进行确定,没有体现出不同方法提取出的雪线高度之间的差异。本文分别借助遥感和经验公式的方法从不同角度对天山西部山区喀什河流域的雪线进行提取,并分析其时空变化规律。

## 1 研究区概况

喀什河流域位于新疆中段天山山脉西部,东经 81°40′ - 85°10′、北纬 43°25′ - 44°15′ 处,集水总面积达 9 590 km<sup>2</sup>。地势由东向西逐渐降低,山峰平均海拔高于 2 000 m,最高海拔至 4 615 m。流域为温带大陆性气候,水汽主要来源于大西洋暖湿空气的输送,由于其地处高寒干旱山区,多数山峰均分布着季节性积雪和冰川,导致流域内汛期径流主要源于融雪径流补给。流域控制断面为乌拉斯台水文站,站点位于东经 83°7′、北纬 43°48′ 处,海拔为 1 440 m,站点处多年平均降雨量为 382.3 mm,多年平均气

温为 6.4℃,干流主体为 SE-NW 走向,下游向西至与巩乃斯河汇合。根据天山自然地理分带,将喀什河划分为:丘陵带(海拔 < 1 600 m)、山地森林带(海拔 1 600~2 000 m)、高山草甸带和亚高山草甸带(2 200~3 300 m)以及冰雪带和终年积雪带(>3 300 m)<sup>[20]</sup>。

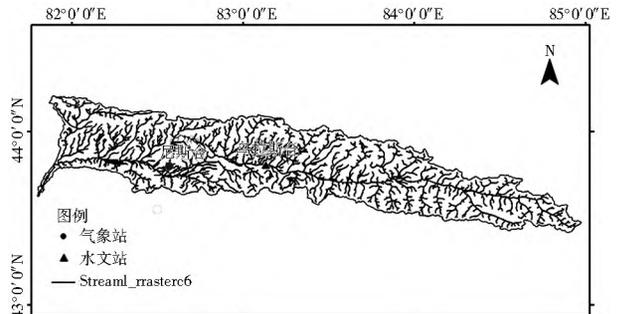


图 1 喀什河流域示意图

Fig. 1 A diagram of the Kashi River Basin

## 2 数据来源及研究方法

为更加合理的分析研究区雪线变化规律,指导雪线相关方面的研究,采用遥感监测雪线法、气候雪线法以及雪线场法<sup>[22]</sup>对流域雪线时空分布规律进行研究。

### 2.1 数据来源

(1) MODIS 数据。数据来源于美国航天局 NASA(<https://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>) 的八日合成 MOD10A2 积雪产品数据,分辨率为 500 m × 500 m。

(2) DEM 数据。数据来源于美国航天局 NASA(<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>) 的 DEM 数据,分辨率为 90 m × 90 m。

(3) 实测气象数据。数据来源于新疆水文年鉴中尼勒克气象站的实测数据,选取时间序列为 1959-2015 年的月均降水和气温数据。

### 2.2 研究方法

(1) 遥感监测雪线法。

基于所选用的分辨率为 500 m × 500 m 的 8 日合成积雪数据 MOD10A2 以及 90 m × 90 m DEM 数据,经过投影转换和去除边界处理以及叠加 DEM 数据,得到研究区不同时期 8 日雪线,即积雪像元、陆地像元的边界线及其高程数据。流域平均雪线的采用如下计算为:

$$h = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (1)$$

式中:  $h$  为流域平均雪线高度(m);  $h_i$  为单个雪线像

元的高度 (m);  $n$  为雪线像元个数。

## (2) 气候雪线法。

气候雪线是反映大气固态降水零平衡的雪线, 也称之为理论雪线<sup>[23-24]</sup>。其在雪线确定过程中只考虑降水和气温这两种气候因素, 不受地形、坡向等下垫面因素影响, 故采用水文气象数据进行研究区气候雪线的确定。据吴锡浩<sup>[23]</sup>等学者研究表明, 我国西部地区的雪线年均温 ( $T_a$ ) 与年降水量 ( $P_a$ )、年均温 ( $T_a$ ) 与年固态降水率 ( $P_{sa}$ ) 以及年均温 ( $T_a$ ) 与年降雪量 ( $S_a$ ) 之间的相关关系如下<sup>[23-24]</sup>:

$$T_a = -9.22 + 0.00407P_a \quad (2)$$

$$T_a = -9.22 + 0.00407P_{sa} \quad (3)$$

$$T_a = -9.67 + 0.00604S_a \quad (4)$$

$$S_a = P_a \times P_{sa} \quad (5)$$

据蒋复初<sup>[24]</sup>研究认为, 当山峰高于气候雪线出现多年积雪时, 积雪的消融和累积主要取决于夏季气温, 且我国西北地区夏季 7 月均温最高, 约 7.4 °C, 故认为达到气候雪线区域的条件为  $T_a \leq 0$  °C,  $P_a \geq 50$  mm,  $P_{sa} \geq 60\%$ ,  $T_7 < 7$  °C。

## (3) 基于空间尺度进行雪线变化规律分析。

为合理的确定雪线在空间的变化规律, 以提取得到的雪线像元为依据, 选用目前应用较多、效果较好的 Kriging 空间插值法进行雪线的插值处理, 以得到研究区消除地形影响的空间雪线场。

## 3 结果与分析

### 3.1 遥感监测雪线分析

考虑到雪线的高度随着时间推移在年内和年际间发生不同变化, 基于喀什河流域 2000–2016 年八日合成 MOD10A2 积雪产品数据, 采用遥感监测雪线法得到研究区遥感监测的雪线数据, 并进行处理分析, 得到多年平均 8 日的最高、平均及最低雪线高度图 (图 2) 和融雪期和累积期的期初期末雪线高度图 (图 3) 以及年均雪线与降水、气温关系图 (图 4)。

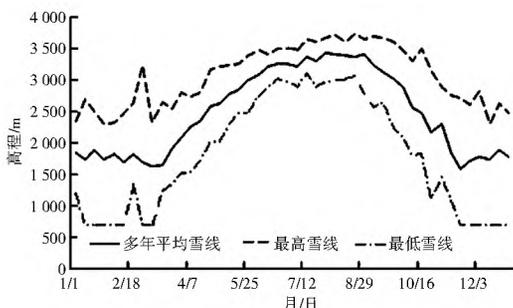


图 2 喀什河流域雪线高度变化

Fig. 2 Variability of snowline elevation values in Kashi River basin

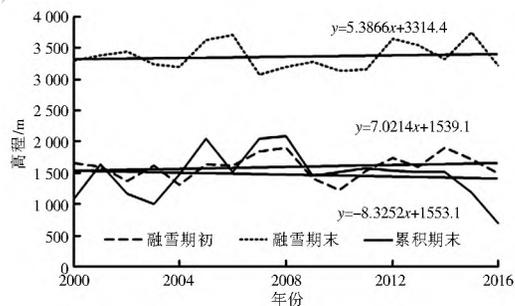


图 3 累积期和融雪期的期初和期末时的雪线高度

Fig. 3 Snowline elevation at the beginning and end of the snow accumulation period and ablation period

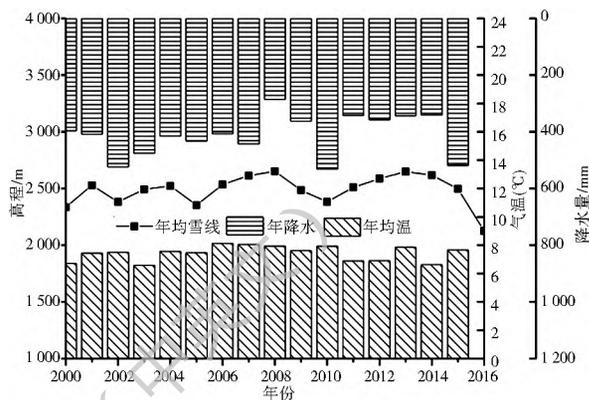


图 4 年均雪线与降水和气温的变化趋势

Fig. 4 Change tendency of snowline with precipitation and temperature from 2000 to 2016

从图 2 可以看出, 最高雪线、最低雪线、平均雪线都呈先升高后降低的趋势。每年 1 月到 3 月为积雪稳定期, 在此时间段中雪线高度较为稳定, 平均雪线维持在 1 754.4 m 左右, 但由于逆温层的存在, 导致最高雪线和最低雪线在 2 月底有突变现象, 使雪线高度有明显的抬升; 融雪期从每年 3 月中旬开始, 此时平均雪线为 1 650.1 m, 之后气温上升, 积雪消融, 雪线高度持续抬升, 直到 8 月底积雪停止消融达到最高平均雪线, 雪线高度为 3 435.6 m, 在此高度以上为流域的永久积雪覆盖区; 累积期从每年 9 月初开始, 此时平均雪线为 3 248.6 m, 之后气温下降, 高海拔地区积雪积累, 雪线高度持续下降, 直到 11 月中旬积雪累积达到最大, 此时平均雪线高度为 1 587.1 m; 11 月中旬之后, 又为积雪稳定期, 平均雪线稳定的维持在 1 752.8 m。分析最高雪线和最低雪线的差值, 得出夏季的雪线高度平均变化范围为 638.6 m, 而冬季的雪线高度最大变化范围为 1 775.4 m, 表明冬季雪线高度的变化波动要大于夏季雪线高度的变化波动。

由图 3 可以看出, 融雪期初雪线在 1 200~2 000 m 范围波动, 雪线呈上升趋势, 表明春季融雪开始时间提前, 最高雪线点出现在 2008 年, 雪线高度为 1 912 m, 反映了 2008 年融雪开始时间较其他

年份更早;融雪期末雪线高度在 3 000~ 4 000 m 范围波动,雪线呈微弱上升趋势,表明流域的最高雪线稍有抬升;累积期末雪线高度在 700~ 2 000 m 范围波动,雪线呈下降趋势,表明累积期结束时间提前,累积期末最低雪线点出现在 2016 年,雪线高度为 693 m,反映了 2016 年累积期较其他年份更早的结束。累积期末和融雪期初的雪线高度大致相同,在这一阶段雪线高度保持稳定。

图 4 中年均雪线总体趋势较为稳定,多年平均雪线高度为 2 486.1 m。逐年雪线高度表现出较为明显的波动特征,波动变化可分为五个阶段,前五年为稳定阶段,雪线维持在 2 330~ 2 530 m 之间,之后每三年为一个阶段表现出波动上升或下降趋势,波动幅度随时间推移越来越剧烈。结合年降水资料可以看出,降水量和雪线高度呈明显反相关关系,降水量增多,雪线下降,反之降水减少,雪线抬升。但 2001、2012 年雪线和降水表现出良好的同步性,结合年均气温发现,2001 年均气温(7.4 °C)较 2007 年(6.7 °C)高 0.7 °C,2012 年均气温(6.9 °C)较 2011 年(6.8 °C)高 0.1 °C,年均气温的上升加剧了全年积雪的消融。通过分析得出,年均雪线的变化主要受降水制约,年均气温也对年均雪线有影响作用。年均雪线高度最高点出现在 2008 年,高度为 2 652.1 m,结合 2008 年的年降水总量 285.5 mm 得出,2008 年为 2000~ 2016 年之间的特枯水年,较少的降水可能直接阻碍到了积雪的累积;最低点出现在 2016 年,高度为 2 124.5 m,2016 年为特丰水年,仅到 6 月底降水量就达 305.9 mm、7 月 28 日到 8 月 2 日降水量达 76.6 mm,较多的降水推进积雪的累积,并结合 MODIS 数据可以看出全流域积雪覆盖时段较长,导致 2016 年雪线高度最低。

为了分析不同季节的雪线高度变化规律,再依据季节尺度进行划分,得到各季节雪线的高度图(图 5)。由图 5 可以看出,夏季雪线呈微弱下降趋势,秋季雪线基本呈稳定趋势,夏季平均雪线高度为 3 316.2 m,秋季为 2 454.3 m,春季雪线和冬季雪线呈明显上升趋势,春季平均雪线高度为 2 343.9 m,冬季为 1 760.6 m,冬季雪线上升幅度最大,表明春季积雪消融量逐年增大,冬季低海拔地区积雪的累积有明显减少趋势。考虑到春季为高寒山区融雪的主要时期,融雪期在分析河流补排关系及洪水预报中有重要意义,故对春季雪线和气候关系进行分析研究。从图 6 可以看出,春季雪线和春季均温表现为良好的正相关关系,即随着气温上升或下降,雪线呈现抬升或下降的趋势,但 2008 年年均气温和雪线呈相

反性,结合 2007 年和 2008 年的降水分析,2008 年降水量(95.1 mm)较 2007 年降水量(186 mm)低了 90.9 mm,春季降水量的减少影响到了积雪的消融,使得气温和雪线表现为反相关。降水量和雪线部分年份呈正相关,而部分年份雪线高度和降水量表现为反相关。通过综合分析得出,在研究区春季雪线的高低主要受气温制约,同时降水也对其有影响作用。

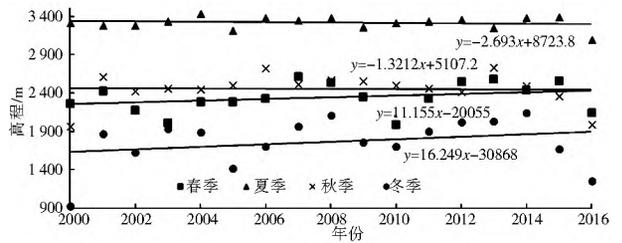


图 5 季节雪线的变化趋势

Fig. 5 Variability of seasonal snowline elevation values

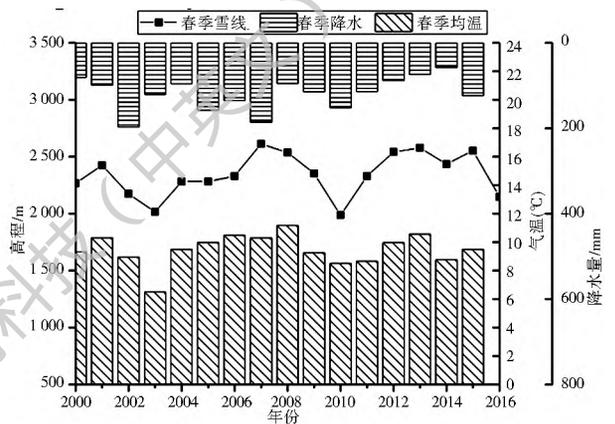


图 6 春季雪线与气温和降水变化趋势

Fig. 6 Change tendency of snowline with temperature and precipitation in spring

### 3.2 气候雪线分析

为分析气候雪线的具体高度,以 100 m 高度为间隔,借鉴已有资料参考研究区的降水和气温在垂直方向上的变化规律插值得到不同高程带的年均温、年降水、年固态降水率及 7 月均温以寻求达到条件的气候雪线高度<sup>[24]</sup>。具体以气温递减率以 0.65 °C/(100m) 为标准<sup>[25]</sup>,降水计算公式为:

$$P_{i+1} = P_i + H_i \times Q \quad (6)$$

式中: $P_{i+1}$  为下 100 m 区域高度的降水量(mm); $P_i$  为此 100 m 区域高度的降水量(mm); $Q$  为降水递减率(mm/(100m)); $H_i$  为降水递减率修正系数。

依据尼勒克站气象数据,借助式(2)至式(6),依照上述四个气候雪线取值参考条件,得出喀什河流域气候雪线高度的年际变化趋势(图 7),并对比同时段的遥感雪线,分析两种雪线高度的变化规律。由图 7 可以看出,气候雪线总体呈上升趋势,多年平均雪线高度为 3 062.1 m。低值点出现在 1972 年,

雪线高度为 2 706 m, 高点出现在 2015 年, 高度为 3 506 m, 两者之间差值达 1 400 m, 结合气温数据得出, 不同年份的相同高度处气温相差 1 °C, 气候雪线要相差 200~ 300 m。在 1972~ 1973 年间及 2003~ 2004 年间有较大的雪线高度差, 差值均为 400 m, 1972 年气候雪线高度 2 706 m 处 7 月均温为 6.4 °C, 在 1973 年相同高度 2 706 m 处 7 月均温为 9.1 °C, 相差 2.7 °C; 2003 年气候雪线高度 2 806 m 处 7 月均温为 6.9 °C, 在 2004 年相同高度 2 806 m 处 7 月均温为 9.2 °C, 相差 2.3 °C; 表明在 1972~ 1973 年和 2003~ 2004 年这两组相邻年份间气温变化较其他年份剧烈。对比 2000~ 2015 年的气候雪线和遥感年均雪线发现, 2000~ 2015 年间气候雪线和遥感雪线两者趋势相同, 均呈上升趋势, 表明研究区的气候变化导致雪线高度上升, 积雪消融量增加。对比两种雪线的高度, 气候雪线高度要明显高于遥感雪线, 两者最大相差 1 005.75 m, 结合遥感雪线高度为实际观测影像数据处理得出这一原因, 表明在流域中植被、山体坡度及地形等下垫面因素阻碍了气候变化导致的融雪过程, 使得受综合因素影响的雪线高度要低于只受气候因素影响的雪线, 且两种雪线各年份差值均不相同也说明下垫面等因素对雪线的影响随时间发生着动态变化。

小于 1 000 m, 雪线高度表现出流域上下边界处高、中部低的趋势。

依天山自然地理分带对区域雪线分析得出: 丘陵带主要分布在流域西南部分, 占流域西部大部分面积, 面积达 2 516.49 km<sup>2</sup>, 此带地势平缓, 雪线高度分布在 800~ 1 600 m, 雪线等值线总体较稀疏, 表明分带内雪线总体上升趋势平缓, 但分带南边界处有一密集等值线区, 雪线高度达 1 800 m。山地森林带主要分布在流域中南部和西北部分, 跨度面积较丘陵带小, 面积达 2 236.63 km<sup>2</sup>, 此带雪线高度分布在 1 600~ 2 200 m, 总体雪线变化梯度较丘陵带大, 分带南部雪线高度达 2 400 m。高山草甸和亚高山草甸带主要分布在流域北侧和南侧居中部, 所占流域面积最大, 面积达 3 297.98 km<sup>2</sup>, 在此分带内雪线等值线也是全流域最为密集的, 雪线分布在 2 200~ 3 200 m; 流域南边界处附近, 为海拔较低的山峰, 雪线高度等值线出现较多同心圆状, 此处雪线高度为分带内最高; 靠近流域东部, 雪线高度变化梯度较大, 呈现南北高中部低的趋势, 变化幅度在 2 000~ 2 200 m 之间。冰雪带和终年积雪带主要分布在流域最东处和东北边界处, 此分带所占流域面积最小, 仅为 1 575.9 km<sup>2</sup>, 此带雪线高度最高, 在 3 300 m 以上, 雪线高度等值线密度较高山草甸带稀疏, 分带东部多为流域高海拔山峰, 雪线等值线呈现同心圆状, 雪线高度达全流域最高, 在 3 400 m 以上。分带中部内有一低值区, 雪线高度在 3 000~ 3 200 m 之间, 表明此处为较低高程的河谷地区。

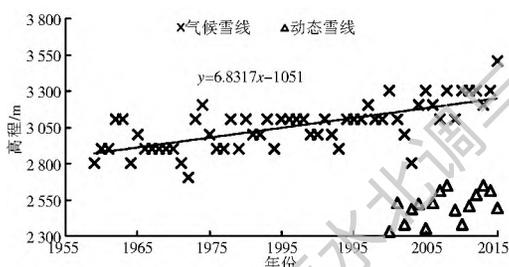


图7 流域气候雪线高度变化

Fig. 7 Variability of climate snowline elevation values in basin

### 3.3 雪线场分析

为分析雪线在空间尺度上变化规律, 基于 Kriging 插值法<sup>[26]</sup>生成喀什河流域雪线高度场(图 8)。研究区总体雪线高度趋势由西向东逐渐升高, 由南向北逐渐升高, 没有表现出纬度经度的地带性, 而是表现出明显山体地形高度分布对雪线高度抬升的影响, 具体地区的雪线受山体的坡度、坡向等下垫面因素及水汽的运输的影响表现出较为复杂的分布。多年平均流域雪线高度分布在 800~ 4 200 m 之间, 最低值出现在流域西南部分, 最高值出现在流域东部地区, 东西跨度上雪线高度差 3 600 m 左右; 南北跨度上在流域西部差值在 1 000~ 1 600 m 之间, 雪线高度由南向北抬升。在流域东部差值基本

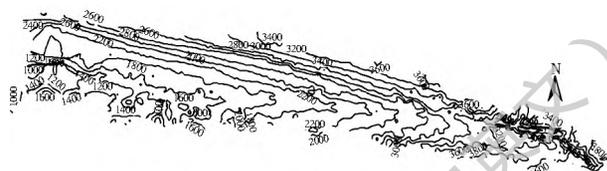


图8 喀什河流域多年平均雪线高度场

Fig. 8 Fields of multi year mean snow line altitude in Kashi River basin

考虑到在时间尺度上降水对不同空间位置的雪线高度影响不同, 基于尼勒克的降水量进行典型年的选取, 以 2003 年为丰水年, 以 2013 年为枯水年, 绘制雪线高度场进行雪线的空间分布的分析。(图 9、图 10)。

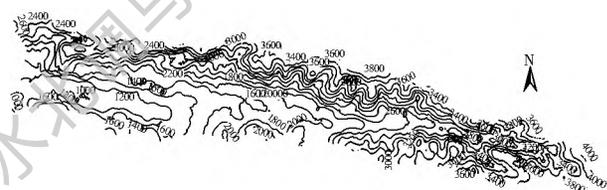


图9 喀什河流域枯水年雪线高度场

Fig. 9 Fields of snow line altitude in dry years in Kashi River basin

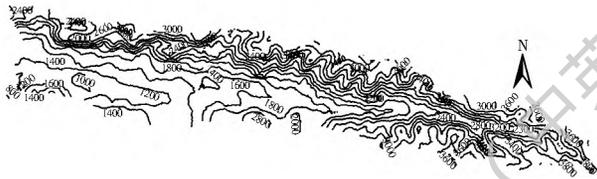


图10 喀什河流域丰水年雪线高度场

Fig. 10 Fields of snow line altitude in wet years in Kashi River basin

由图9及图10对比图8可以看出多年平均雪线场在流域北部较年雪线场更为平滑,进一步的消除了地形对雪线高度场的影响。2003和2013两年的雪线场总体变化不大,均与地形高度有着相同的变化趋势,具体部分表现出在2000 m海拔以下丰水年雪线高度较高于枯水年的高度,丰水年平均雪线高度为1616.09 m,枯水年为1483.17 m,两个年份的雪线高度差为132.92 m;在2000 m以上丰水年雪线高度较低于枯水年的,丰水年平均雪线高度为2971.74 m,枯水年为3052.7 m,高度差为80.96 m。结合气温数据得出,2000 m处年均温在0℃左右,为积雪或融雪的临界温度。表明在2000 m以下降水对积雪起到消融作用,2000 m以上降水对积雪的累积起到推进作用。

#### 4 结语

为了更好的指导高寒山区冰雪水资源的开发,雪线的研究起到至关重要的作用。因此,借助研究区遥感数据及水文气象数据,采用多种方法对喀什河流域雪线的时空变化规律进行分析,得到以下结论。

(1) 借助遥感监测雪线法可以看出,每年1月到3月为积雪稳定期;融雪期从每年3月中旬开始,至8月底结束,达到流域最高雪线;累积期末结束在11月中旬。在季节尺度上,夏季雪线呈微弱下降趋势,秋季雪线基本呈稳定趋势,春季雪线和冬季雪线呈明显上升趋势;在年际尺度上,逐年雪线高度表现出较为明显的波动特征,前五年为稳定阶段,之后每三年为一个阶段表现出波动上升或下降趋势。年均雪线对降水有很好的响应,表现为反相关关系;春季雪线对气温有很好的响应,表现为正相关关系。

(2) 借助气候雪线法可以看出,2000—2015年间气候雪线和遥感雪线均呈上升趋势。气候雪线高度要明显高于遥感雪线,两者最大相差1005.75 m,说明在流域中植被、山体坡度及地形等下垫面因素阻碍了气候变化导致的融雪过程,且两种雪线各年份差值均不相同也说明下垫面等因素对雪线的影响随时间发生着动态变化。

(3) 通过空间雪线场可以看出,雪线场的总体高度趋势由西向东逐渐升高,由南向北逐渐升高,最低

值出现在流域西南部分,最高值出现在流域东部地区,且由自然地理分带分析得出,在研究区雪线高度分布主要受地形和下垫面影响。对比丰水年和枯水年的空间雪线场,以2000 m为界限,界限以下降水对积雪起到冲刷消融作用,界限以上降水加大了积雪的积累。

尽管采用了多种数据,借助了多种方法分析了雪线的时空分布规律,但由于遥感数据分辨率较低,山区水文气象站点一般布设在出山口,没有足够的代表性,从而使得对雪线变化规律的认识存在不足。随着高空水文气象数据和更高精度的遥感数据等数据源的出现,能为以后更准确的研究雪线分布规律的起到了重要作用。

#### 参考文献(References):

- [1] 沈永平,苏宏超,王国亚,等.新疆冰川、积雪对气候变化的响应(Ⅱ):水文效应[J].冰川冻土,2013,35(3):531-527. (SHENG Y P, SU H C, WANG G Y, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (Ⅱ): Hydrological Effect [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 531-527. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0061.
- [2] 张国飞,李忠勤,王文彬,等.天山乌鲁木齐河源1号冰川1959-2009年物质平衡变化过程及特征研究[J].冰川冻土,2012(6):1301-1309. (ZHANG G F, LI Z Q, WANG W B, et al. Change processes and characteristics of mass balance of the Urumqi glacier no. 1 at the headwaters of the Urumqi River, Tianshan Mountains, During 1959-2009 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012(6): 1301-1309. (in Chinese))
- [3] 张连成,胡列群,李帅,等.基于GIS的天山南北坡雪线分布特征及其影响因素分析[J].水土保持研究,2015,22(3):259-263. (ZHANG L C, HU L Q, LI S, et al. GIS Based analysis on the snowline distributional characteristics of south and north slopes of Tianshan mountain and their influencing factors [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(3): 259-263. (in Chinese)) DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2015.03.046.
- [4] 唐志光,王建,梁继,等.基于MODIS的青藏高原雪线高度遥感监测[J].遥感技术与应用,2015,30(4):767-774. (TANG Z G, WANG J, LIANG J, et al. Monitoring of snowline altitude over the Tibetan Plateau based on MODIS Data [J]. Remote Sensing Technology And Application, 2015, 30(4): 767-774. (in Chinese)) DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2015.4.0767.
- [5] 杨存建,赵梓健,倪静,等.基于MODIS数据的川西积雪时空变化分析[J].中国科学:地球科学,2011,41(12):1743-1750. (YANG C J, ZHAO Z J, NI J, et al. Temporal and spatial analysis of changes in snow cover in Western Sichuan Based on MODIS images [J]. Science China Earth Sciences, 2011, 41(12): 1743-1750. (in Chinese)) DOI: 10.1007/s11430-011-4336-5.
- [6] 赵军,黄永生,师银芳,等.2000—2012年祁连山中段雪线与气候变化关系[J].山地学报,2015,33(6):683-689. (ZHAO J, HUANG Y S, SHI Y F, et al. Relationship between snow line change and climate change in the Middle of Qilian Mountains during 2000-2012 [J]. Mountain Research, 2015, 33(6): 683

689. (in Chinese) DOI: 10.16089/j.cnki.10082786.000082.
- [7] 韩芳,张百平,谭靖,等. 山体基面高度对青藏高原及其周边地区雪线空间分布的影响[J]. 地理研究, 2014, 33(1): 23-30. (HAN F, ZHANG B P, TAN J, et al. The Effect of mountain basal elevation on the distribution of snowline with different mountain basal elevations in Tibetan Plateau and its Surrounding Areas[J]. Geographical Research, 2014, 33(1): 23-30. (in Chinese) DOI: 10.11821/dlyj201401003)
- [8] VERDHEN A, CHAHAR B R, GANJU A, et al. Modeling Snow Line Altitudes in the Himalayan Watershed[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2016, 21(1): 04015056. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001255.
- [9] 张连成,胡列群,李帅,等. 基于遥感影像的雪线高程提取方法对比分析——以天山北坡为例[J]. 干旱区地理, 2015, 38(04): 788-796. (ZHANG L C, HU L Q, LI S, et al. Comparison of snowline elevation extraction method based on remote sensing image: A case of north slope of Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(04): 788-796. (in Chinese) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2015.04.017.
- [10] 刘耕年,陈艺鑫,张梅,等. 喜马拉雅山佩枯岗日冰川地貌的年代学、平衡线高度和气候研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(05): 959-970. (LIU G N, CHEN Y X, ZHANG M, et al. Glacial landform chronology and environment reconstruction of Peiku Gangri, Himalayas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(05): 959-970. (in Chinese))
- [11] 史建桥,白淑英,高吉喜,等. 近10a 青藏高原雪线时空变化及其与气象因素关系分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015, 9(03): 7-13. (SHI J Q, BAI S Y, GAO J X, et al. Spatial and temporal variation of snow line and its relationships with meteorological factors in Tibet Plateau in recent 10 years[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2015, 9(03): 7-13. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1002-0799.2015.03.002.
- [12] HUANG L, LI Z, TIAN B, et al. Classification and snow line detection for glacial areas using the polarimetric SAR image[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(7): 1721-1732. doi: 10.1016/j.rse.2011.03.004.
- [13] KRAJCI P, HOLKO L, PERDIGAO R A P, et al. Estimation of Regional Snowline Elevation (RSLE) from MODIS Images for Seasonally Snow Covered Mountain Basins[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519(B): 1769-1778. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.08.064.
- [14] KRAJČÍ P, HOLKO L, PARAJKA J. Variability of snow line elevation, snow cover area and depletion in the main slovak basins in winters 2000-2014[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2016, 64(1): 12-22. DOI: 10.1515/johr.2016.0011.
- [15] 杨俊华,秦翔,吴锦奎,等. 祁连山老虎沟流域春季积雪属性的分布及变化特征[J]. 冰川冻土, 2012, 34(05): 1091-1098. (YANG J H, QING X, WU J K, et al. Distribution and Variation of Spring Snow Cover in Laohugou Watershed of the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(05): 1091-1098. (in Chinese))
- [16] 陈安安,陈伟,吴红波,等. 2000-2013年木孜塔格冰鳞川冰川粒雪线高度变化研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1069-1078. (CHENG A A, CHENG W, WU H B, et al. The variations of firn line altitude on the Binglinchuan Glacier, Ulugh Muztagh during 2000-2013[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1069-1078. (in Chinese) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2017.0030.
- [17] 李帅,侯小刚,郑照军,等. 基于2001—2015年遥感数据的天山山区雪线监测及分析[J]. 水科学进展, 2017, 28(3): 364-372. (LI S, HOU X G, ZHEN Z J, et al. Monitoring and analysis of snowline on Tianshan Mountains based on remotely sensed data from 2001 to 2015[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(03): 364-372. (in Chinese) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.03.006.
- [18] 张其兵,康世昌,张国帅. 念青唐古拉山脉西段雪线高度变化遥感观测[J]. 地理科学, 2016, 36(12): 1937-1944. (ZHANG Q B, KANG S C, ZHANG G S, et al. Changes of snow line altitude for glaciers on Westernnyainqentangha range observed by remote sensing[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(12): 1937-1944. (in Chinese) DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.12.020.
- [19] 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. (BAO W J, LIU S Y, WU K P, et al. A method for extracting snow line altitude based on MODIS snow product[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(2): 259-272. (in Chinese) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2017.0030.
- [20] ARIGONY-NEITO J, SAURER H, SIM? ES J C, et al. Spatial and temporal changes in dry-snow line altitude on the Antarctic Peninsula[J]. Climatic Change, 2009, 94(1-2): 19-33. DOI: 10.1007/s10584-009-9550-1.
- [21] 邓育武. 西藏南部冰川系统雪线场的建立及其空间分布特征[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2005. (DENG Y W. Creating fields of equilibrium line altitude and analyzing their space distribution characteristics in the Southern Tibet Glacier System[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2005. (in Chinese))
- [22] 郭忠明,顾祝军,吴红波,等. 冰川雪线高度研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(4): 645-652. (GUO Z M, GU Z J, WU H B, et al. Research progress of glacier snowline altitude[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(4): 645-652. (in Chinese) DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2016.4.0645.
- [23] 吴锡浩,祝一志. 中国气候雪线的高程计算及变化规律[J]. 科学通报, 1990, 35(6): 451-453. (WU X H, ZHU Y Z. Elevation calculation and variation law of climate snowline in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1990, 35(6): 451-453. (in Chinese))
- [24] 蒋复初,吴锡浩,王书兵,等. 中国气候雪线空间分布特征[J]. 地质力学学报, 2002, 8(4): 289-296. (JIANG F C, WU X H, WANG S B, et al. Characteristics of space distribution of the climatic snowline in China[J]. Journal of Geomechanics, 2002, 8(4): 289-296. (in Chinese))
- [25] 穆振侠. 高寒山区降水垂直分布规律及融雪径流模拟研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2010. (MU Z X. Research on vertical distribution law of precipitation and snowmelt runoff simulation in high cold alpine areas[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2010. (in Chinese))
- [26] 王利平,谢自楚,丁良福,等. 基于GIS的羌塘高原冰川系统雪线场的建立及其空间分布特征[J]. 干旱区地理, 2010, 33(5): 692-702. (WANG L P, XIE Z C, DIN L F, et al. Establishing the field of equilibrium line altitude of the glacier system in the Chiangtang Plateau based on geographic information system and its distribution characteristics[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(5): 692-702. (in Chinese) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2010.05.005.