

文章编号: 1008-2786-(2015)6-683-07

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000082

2000—2012 年祁连山中段雪线 与气候变化关系

赵军, 黄永生, 师银芳, 李 龙

(西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 利用 MOD10A2 积雪产品、气温、降水数据和 DEM 数据, 借助于 GIS 空间分析技术和统计方法, 分析 2000—2012 年祁连山中段地区的雪线变化, 并探讨温度和降水对雪线变化的影响。研究结果表明: 1. 2000—2012 年祁连山中段雪线平均高程值呈波动上升, 平均上升速率为 42.3 m/(10 a); 各年的雪线平均高程 > 4 600 m, 多年雪线平均高程值为 4 673 m。2. 祁连山中段地区各坡向的雪线平均高程值、年平均上升速率均呈现相一致的特征, 即阳坡 > 半阴半阳坡 > 阴坡。3. 2000—2012 年暖季气温和 6—8 月累计降水量是影响祁连山雪线变化的重要因素, 暖季气温升高是引起雪线升高的主导因素。在 6—8 月累计降水量保持稳定的情况下, 暖季气温上升(下降) 1℃, 祁连山中段雪线高度上升(下降) 约 58 m。

关键词: 祁连山; 雪线; 气候变化; MOD10A2

中图分类号: P467

文献标志码: A

积雪对地表辐射、能量循环和水循环有着非常重要的影响, 是影响区域和全球气候的一个重要因素^[1]。近年来, 其时空分布与变化引起了地理学家的广泛关注。雪线是陆地上终年积雪(积累区)与夏季无雪区(消融区)之间的零平衡线^[2], 是地理学上的一个重要概念, 能综合反映缺乏地面气象站的高山、高原及极地地区气候环境的基本状态^[3]。雪线是气候的产物, 雪线高程受纬度地带性(温度)、垂直地带性(温度和降水)和地方性气候(主要是降水)的多重性控制^[4]。在我国, 尤其是在青藏高原地区, 由于地形复杂、海拔较高, 改变和破坏了雪线的纬度地带性分布规律^[5]。李吉均、施雅风等^[6-7]在 20 世纪 80 年代对青藏高原雪线的分布规律进行了研究, 结果表明青藏高原雪线呈同心圆状分布。

随着全球气候变暖, 西北地区近几十年来出现了气候向暖湿化转型的信号^[8-9], 祁连山积雪信息

对气候变暖的响应也引起了许多学者的关注。陈乾等^[10]利用 AVHRR 资料反演了祁连山区积雪参量, 得到祁连山区多年平均雪深和积雪频率的空间分布, 同时对祁连山积雪资源进行气候分析。张杰等^[11]利用遥感资料对 1997—2004 年 5—8 月积雪面积进行了连续监测, 分析了祁连山区积雪面积和雪线高度的变化, 得到了祁连山夏季积雪的变化趋势。蔡迪花等^[12]利用 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 卫星反演积雪资料和数字高程模型, 研究分析了祁连山区整体的积雪空间分布状况及其年内变化特征, 以及地形对积雪分布和季节变化的影响。

传统的雪线分布数据主要依据地形图, 结合实地考察来确定。因数据量少、信息不完整, 常用单个点来代表整个山体或区域雪线分布高度, 难以系统反映雪线空间分布规律^[13]。由于缺少雪线直接观测资料, 因而许多学者确定雪线多采用间接的方法,

收稿日期(Received date): 2014-10-11; 改回日期(Accepted): 2015-03-12。

作者简介(Biography): 赵军(1963-), 男, 山西河津人, 教授, 博士生导师, 主要从事资源环境遥感与 GIS 应用研究。[Zhao Jun (1963-), professor, doctoral supervisor, engaged in environmental remote sensing and GIS applied research.] E-mail: zhaojun@nwnu.edu.cn

如赫斯法(地形法)和库罗夫斯基法。这两种方法虽然方便简单,但它的精度和研究效率都不高,只能得到一个粗略的雪线高度值,不能代表当前的雪线高度。随着遥感数据时间、空间与光谱分辨率不断提高以及相应图像处理技术的不断发展,雪盖范围提取技术已较为成熟^[14-15]。目前,利用遥感监测雪盖产品并自动提取雪线方面的研究也较广泛,延昊等^[16]用像元分解法提取积雪边界、肖飞等^[13]提出基于水流路径分析提取雪线的方法,都取得了很好的效果。这两种方法都是利用高分辨率遥感数据(TM/ETM+),但对于中低分辨率的遥感数据(如MODIS)不能达到预期的效果,并且算法复杂,针对较大区域效率不高。因此,本文基于简单的边缘提取算法,利用MODIS雪盖产品(MOD10A2)数据和相应的数字高程模型提取祁连山中段2000—2012年的雪线,并分析其变化,再结合气象站观测资料探讨了气温和降水对其影响。

1 研究区概况

祁连山区位于中国青海省东北部与甘肃省西部边境,由一系列NW—SE走向的平行山脉和宽谷组成。西端在当金山口与阿尔金山脉相接,东端至黄河谷地,与秦岭、六盘山相连,长近1 000 km。祁连山中段^[17]介于36°8′~39°56′N,96°55′~101°41′E(图1),海拔2 007~5 541 m,平均海拔3 750 m,地势西北高,东南低。区内有多条大致平行的NW—SE走向的平行山脉,由北往南依次是走廊南山、冷龙岭西段、托勒山、托勒南山、大通山和青海南山。区内的岗格尕肖合力有“五河之源”之称,是大通河、布哈河、疏勒河、托勒河和黑河的发源地^[18]。该区属于高山高原气候类型,年均温-3.7~-2.6℃,全年降水量270~400 mm,海拔超过4 000 m的高山,降水量可达到600 mm以上,山地垂直带谱分布自上而下分别为冰雪带、草甸草原、灌丛草原、森林草原和草原带。

2 数据与方法

2.1 MODIS 雪盖数据

本文使用中等分辨率成像光谱仪(MODIS)的积雪产品MOD10A2,来源于美国国家雪冰数据中心(<http://nsidc.org>),其空间分辨率为500 m,投影方

式为正弦投影。该产品的优点是经过多次处理,最大程度的降低了云层,尤其是薄云的影响,从而更加准确地反映了积雪覆盖情况。蔡迪花等^[12]对祁连山及周边地区的MOD10A2积雪产品进行了精度检验,平均积雪识别率为85.54%,能够满足本研究需要。因此,本文选取覆盖祁连山中段的h25v05和h26v05轨道2000—2012年6—8月的影像数据,共240景。借助MRT软件对MOD10A2影像数据进行投影转换,投影为WGS84/UTM系统,重采样方法为最邻近法,再用ArcGIS10.0软件进行掩膜处理,得到研究区的数字影像。

2.2 高程和气象数据

数字高程(DEM)来源于国际科学数据服务平台(<http://datamirror.csdb.cn>),空间分辨率为90 m,为了与MOD10A2影像相匹配,将其重采样为500 m。根据蔡迪花等^[12]对祁连山坡向的划分,本文利用DEM进行了坡向分带处理,分为平地、N、NE、E、SE、S、SW、W、NW共9个方向。将N、NE、NW划为阴坡,S、SE、SW划为阳坡,其余为半阴半阳坡。

本文的气象数据来源于中国气象数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>),选取张掖高空站的日平均气温数据和祁连山中段的祁连、野牛沟、托勒、刚察共4个台站的日降水量数据(图1)。

2.3 雪线提取

研究区影像分为陆地、水体、云和积雪4种,其像元值分别为25、37、50和200(图2a)。根据

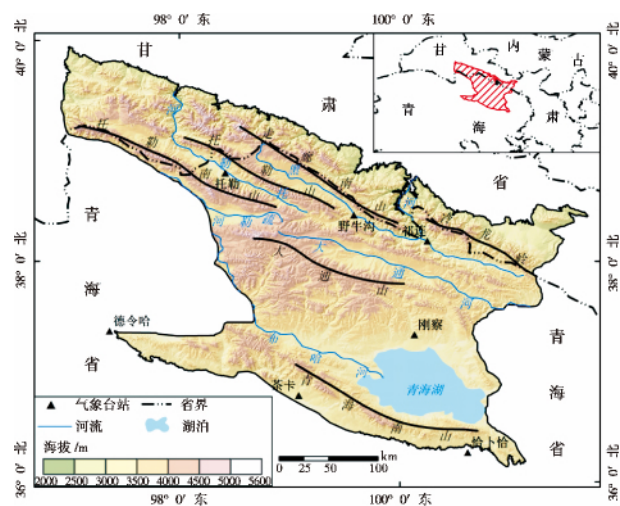


图1 祁连山中段地理位置及气象站点分布

Fig. 1 Map showing the location of the Qilian Mountains and the distribution of weather stations

MOD10A2 影像像元值的含义 将像元值为 200 的积雪格网赋值为 1 ,其余非积雪的格网赋值为 0 (图 2b) ,得到研究区积雪覆盖范围。为了最大程度地减少瞬时性积雪对雪线高度的影响 ,统计每年夏季 (6—8 月) 的积雪覆盖面积 ,选取积雪面积最小的一期 ,利用该期提取的积雪边界线作为本年度的雪线。

借助 ArcGIS10.0 软件 ,利用边缘提取算法提取影像中积雪区的下边缘线作为雪线(图 2c) ,在数字高程模型的基础上 ,利用高程统计的方法计算出每个栅格高程值 ,再计算出整个研究区的雪线平均高程值 ,计算公式为

$$h = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n h(p_k) \tag{1}$$

式中 $h(p_k)$ 为采样单元网格顶点 p_k ($k = 1, 2, \cdots, n$) 的高程; n 为采样单元的总网格数。

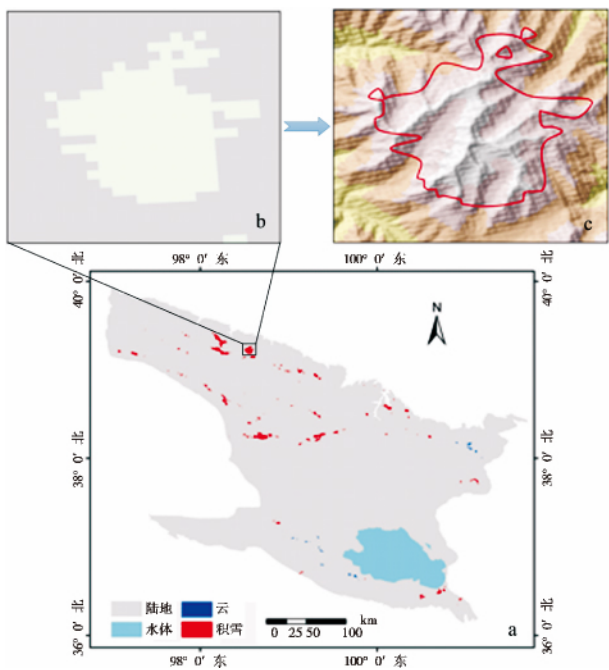


图 2 雪线提取过程示意图
(以 2007—08—21 的数据为例)

Fig. 2 Extraction process maps of snowline
(Data acquisition time: 2007—08—21)

3 结果分析

3.1 雪线变化特征

3.1.1 雪线的年际变化

雪线位置会随着一年内四季的更替发生变化 ,而不同纬度地带的四季划分也略有区别。根据祁连山区中段多年的气象观测数据 ,6—8 月气温为全年

最高 ,降水量也很丰沛 ,积雪面积为全年最小时段 ,故本文选用 2000—2012 年 6—8 月的 MODIS 影像提取雪线。根据雪线提取规则 ,各年份雪线达到时各期影像的日期如表 1。

表 1 祁连山中段雪线高程值分布日期
Table 1 Distribution date of elevation values of snow line

年份	儒略日	通用日期
2000	201	7.19
2001	209	7.28
2002	185	7.4
2003	217	8.5
2004	177	6.25
2005	209	7.28
2006	193	7.12
2007	233	8.21
2008	201	7.19
2009	193	7.12
2010	177	6.26
2011	241	7.29
2012	177	6.25

从表 1 中可以看出:雪线达到最高时 ,77% 的年份处在 7—8 月 ,并且集中在 7 月下旬至 8 月上旬 ,只有 2006 年、2010 年和 2012 年在 6 月底。这与蒲健辰等^[19]观测七一冰川在 7 月下旬至 8 月上旬消融速率达到最大的研究结果相一致。由于夏季气温高 ,季节性积雪基本融化 ,剩下的则为常年积雪和冰川 ,因此雪线变化在一定程度上可以反映该区域气候的变化。

图 3 反映的是 2000—2012 年夏季祁连山中段雪线平均高程值的年际变化。整体而言 ,2000—

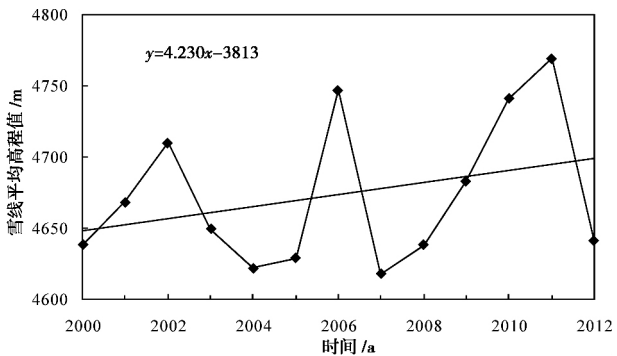


图 3 雪线平均高程值年际变化

Fig. 3 Inter-annual variability of snow line average elevation values

2012 年雪线平均高程值呈波动上升的趋势,上升速率为 $42.3 \text{ m}/(10 \text{ a})$,其中 2007—2011 年是一个连续上升过程,且上升速率较大,达到 $405 \text{ m}/(10 \text{ a})$;祁连山中段地区各年份雪线平均高程 $> 4\,600 \text{ m}$,2000—2012 年雪线高程的平均值为 $4\,673 \text{ m}$,这与高前兆等^[20]的研究结果相一致;2000—2012 年间有 6 a 的平均雪线高程值高于平均值,7 a 处在平均值以下,最大值为 2011 年的 $4\,769 \text{ m}$,最小值则在 2007 年,为 $4\,618 \text{ m}$ 。

3.1.2 不同坡向的雪线变化

雪线的变化与地形因子密切相关,而坡向的不同会导致光、热和气流等产生差异,从而影响到雪线的变化。因此,根据 DEM 数据确定阴坡、阳坡和半阴半阳坡的范围,与雪线高程数据叠加,采用 Arc-GIS 中分区统计模块统计各坡向的雪线高程值,进而分析祁连山区中段 2000—2012 年各坡向的雪线平均高程值变化特征(图 4)。

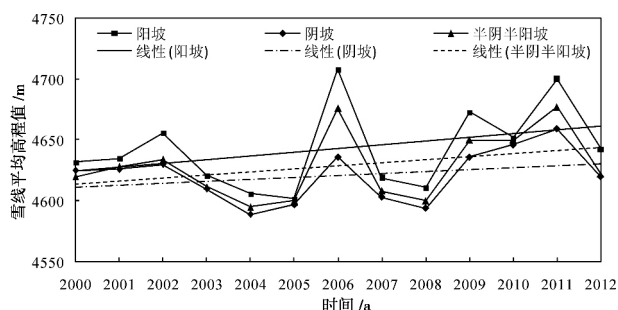


图 4 各坡向雪线平均高程值年际变化

Fig. 4 Inter-annual variability of each aspect snow line average elevation values

由图 4 分析可知,各坡向雪线年际变化趋势与整体雪线变化趋势相同,均呈波动上升趋势。各坡向的年平均上升速率存在差异,阳坡 $[30.7 \text{ m}/(10 \text{ a})] > \text{半阴半阳坡} [24.9 \text{ m}/(10 \text{ a})] > \text{阴坡} [16.1 \text{ m}/(10 \text{ a})]$ 。就各坡向而言,2000—2012 年间,阴坡、阳坡和半阴半阳坡的雪线平均高程值分别为 $4\,621 \text{ m}$ 、 $4\,643 \text{ m}$ 和 $4\,629 \text{ m}$,整个区域平均高程值在 $4\,630 \text{ m}$ 左右;阳坡的雪线高程大于阴坡,半阴半阳坡的雪线平均值处于二者之间。究其原因,主要由于祁连山中段山系以 NW—SE 走向为主,阳坡受到太阳辐射的时间比阴坡长,太阳辐射量较多,气温明显高于阴坡,导致阳坡的雪线比阴坡高 22 m 。综上所述,祁连山中段地区各坡向的雪线平均高程值和年平均上升速率均呈现相一致的特征规律,即阳

坡 $> \text{半阴半阳坡} > \text{阴坡}$ 。

3.2 雪线与气候变化关系

3.2.1 气候特征

祁连山中段地区雪线的最大高程值在 7—8 月较为集中,为了更加准确地反映气候变化对雪线高度的影响,进一步分析了研究区 2000—2012 年气温和降水的变化趋势。由于地面气象站的气温不能代表雪线高度处的气温,而张掖高空站 5—8 月 600 hPa 的平均高度基本在海拔 $4\,400 \text{ m}$ 左右,其气温与雪线高度处的气温十分接近,因此利用张掖高空站 600 hPa 气温来分析祁连山中段雪线高度处的气温变化。

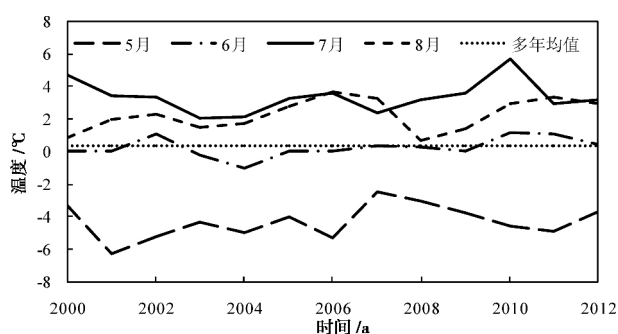


图 5 2000—2012 年 5—8 月祁连山中段代表站 600 hPa 高度温度特征

Fig. 5 Variations of temperature at 600 hPa height of the representation stations in the central of Qilian Mountains from May to August, 2000—2012

图 5 是 2000—2012 年 5—8 月祁连山中段代表站 600 hPa 高度温度特征,5 月祁连山中段 600 hPa 高度的月平均气温为负,说明 5 月雪线高度处的气温为负,可认为积雪仍属于积累阶段;6 月 600 hPa 高度的气温与平均值接近,基本处于 0°C 层,没有高温值和低温值,趋势较为平缓;7—8 月 600 hPa 高度的气温达到一年中的最大值,冰雪消融量急剧,雪线高度也达到最大。由上述分析可知,冰雪消融量在 7 月最强,8 月次之,最后是 6 月,9 月到次年 5 月都为积雪积累期。因此,在下文分析气温、降水与雪线变化关系时,用 600 hPa 高度处 6—8 月平均气温(简称暖季气温)和研究区内积雪消融期(6—8 月)地面气象站的累计降水量来分析,其中累计降水量为 6—8 月日降水量的累加。

2000—2012 年暖季气温与累计降水量变化趋势如图 6 所示,2000—2012 年雪线处的暖季气温和 6—8 月累计降水量都呈波动增加趋势,对其线性拟

表 2 2001—2012 年气温和降水较之上年变化情况

Table 2 The temperature and precipitation changes from 2000 to 2012 compared with the previous year

时间	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年
气温	微降	上升	大幅下降	下降	大幅上升	上升	下降	下降	微升	大幅上升	大幅下降	下降
降水	大幅下降	大幅上升	大幅上升	大幅下降	大幅上升	大幅上升	微升	下降	微升	大幅下降	大幅上升	上升

注: 该年度与上年连线的倾角定义为 α , 当 $0^\circ < \alpha \leq 30^\circ$ 记为微升, 当 $30^\circ < \alpha \leq 60^\circ$ 记为上升, 当 $60^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ 记为大幅上升; 当 $0^\circ > \alpha \geq -30^\circ$ 记为微降, 当 $-30^\circ > \alpha \geq -60^\circ$ 记为下降, 当 $-60^\circ > \alpha \geq -90^\circ$ 记为大幅下降。

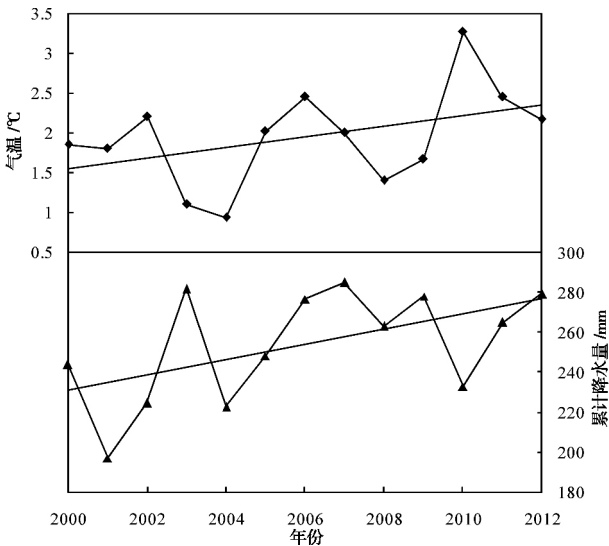


图 6 祁连山中段暖季气温和累计降水量

Fig. 6 Air temperature of warm season and total precipitation in the central of Qilian Mountains

合结果显示 2000—2012 年暖季气温的增加趋势略小于 6—8 月累计降水量的增加趋势。气温每年平均升高 0.066°C , 累计降水量每年平均增加 3.8 mm 2000—2012 年暖季气温上升了 0.858°C , 累计降水量增加了 49.4 mm , 说明研究区气候变暖变湿, 这与施雅风等^[7-8]得出的西北地区气候由暖干向暖湿转变相一致。理论上, 气温升高引起雪线高度上升, 而降水量增加则引起雪线高度的降低, 而同期的祁连山中段雪线高度呈上升趋势, 这表明 2000—2012 年间祁连山雪线高度的上升主要是由气温升高所导致, 说明祁连山雪线高度变化主要受暖季气温控制。王宁练等^[21]分析祁连山七一冰川平衡线高度变化的影响因子、陈安安等^[22]研究木孜塔格冰鳞冰川冰川粒雪线高度变化时, 也都得到夏季气温波动是雪线变化主导气候因子的结论。

3.2.2 雪线高度对气候变化的响应

依据图 6 可以得到 2001—2012 年气温和降水较之上年变化情况 (表 2)。根据图 3 和表 2 综合分析气温和降水对雪线高程值的影响, 得到以下结论:

除 2001 年、2008 年、2011 年外, 其余年份祁连山中段雪线的变化趋势与对应年份气温的变化趋势一致, 说明影响雪线变化的主导因子是暖季气温; 但如 2005 年, 当气温大幅度升高时雪线却没有随之大幅度升高, 其原因是相应时段降水量大幅度的增加, 抑制了气温升高对雪线的影响; 当年的降水量若低于近年来的平均值时, 降水量的减少也会引起雪线的升高, 如 2001 年和 2008 年。

上述研究结果表明, 区域雪线的变化与温度和降水量存在明显关系。雪线变化虽然能够反映气候变化的特征, 但不太直观。本文引用张杰等^[11]推导的祁连山区中部雪线对气候波动的响应模型, 其雪线对气温、降水波动的响应为

$$SL = 31.9T + 0.348P \quad (2)$$

式中 SL 为雪线, T 为暖季温度, P 为降水量。

由公式 (2) 可以看出, 气温是影响区域雪线变化的主导因素。由于暖季气温是影响祁连山中段雪线高度的主导因子, 根据王宁练等^[21]在祁连山七一冰川得到的平衡线高度与暖季气温之间存在线性关系的结论, 本研究直接应用祁连山中段雪线高度和暖季气温的数据建立二者之间的线性关系

$$SL = 58.41T + 4559 \quad (R^2 = 0.475, n = 13) \quad (3)$$

式中 SL 为雪线, T 为暖季温度。统计关系的方差检验结果表明: 其显著性水平 < 0.05 , 说明祁连山中段雪线高度和暖季气温之间存在较好的线性关系。因此, 可以通过公式 (3) 来分析祁连山中段雪线高度对气温变化的敏感性。结果表明: 如果暖季气温上升 (下降) 1°C , 祁连山中段雪线高度将上升 (下降) 58.41 m 。

综上所述, 祁连山区中段雪线的变化与气温和降水变化密切相关, 气温上升会促进雪线升高, 而降水的增加又会抑制这种变化; 整体而言, 2000—2012 年期间祁连山中段地区的雪线平均高程增加, 这主要是由于气温升高引起的。究其原因在于气温对雪线的影响是持续的, 而降水则是间断的, 在降水量保持多年基本稳定的情况下, 气温就成为影响雪线高

低的主导因素。

4 结论与讨论

本文通过对 2000—2012 年祁连山中段雪线年际变化和不同坡向的变化以及与气温、降水的关系进行分析,得出以下结论:

1. 2000—2012 年祁连山中段雪线平均高程值呈波动上升趋势,上升速率为 42.3 m/(10 a);各年的雪线平均高程值都大于 4 600 m,多年雪线平均高程值为 4 673 m。

2. 祁连山中段地区各坡向的雪线平均高程值和年平均上升速率均呈现相一致的特征规律,即阳坡 > 半阴半阳坡 > 阴坡。2000—2012 年,阴坡、阳坡和半阴半阳坡的雪线平均高程值分别为 4 621 m、4 643 m 和 4 629 m。

3. 2000—2012 年祁连山中段地区暖季气温和 6—8 月累计降水量均呈波动上升趋势,暖季气温和 6—8 月累计降水量是影响祁连山雪线变化的重要因素,其中暖季气温升高是引起雪线升高的主导因素。在 6—8 月累计降水量保持稳定的情况下,暖季气温上升(下降) 1℃,祁连山中段雪线高度将上升(下降) 58.41 m。

由于雪线受到气温、降水及地形的影响,空间分布较为复杂。本文基于简单的边缘提取算法利用 MODIS 影像对祁连山中段的雪线提取进行了实验研究,这对提取大区域的雪线具有重要的借鉴意义。但由于 MODIS 卫星空间分辨率低,使提取的雪线高度存在一定程度上的不确定性,这种不确定性将伴随着空间分辨率更高的卫星数据引入而大大降低。雪线高度可以作为平衡线高度的指示因子这一观点已经在热带的一些冰川得到验证,但不同的区域所处的气候类型不同,其对气候变化响应是否存在地区差异,这一点有待于进一步研究。

参考文献(References)

- [1] Wang Shaowu. Snow covered and climate change [J]. Geographical Research, 1983, 2(3): 73–86 [王绍武. 冰雪覆盖与气候变化 [J]. 地理研究, 1983, 2(3): 73–86]
- [2] Kalesnik. Overview of glaciology [M]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environment al and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Science, 1982: 28–40 [卡列斯尼克. 冰川学概论 [M]. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1982: 28–40]
- [3] Deng Yuwu, Xie Zichu, Li Lingling. Creating the distribution field of equilibrium line altitude based on GIS in the southern of TIBET and analyzing its distribution characters [J]. Yun Nan geographic environment research, 2006, 3: 10–14 [邓育武, 谢自楚, 李玲玲. 基于 GIS 的西藏南部雪线场的建立及其空间分布特征 [J]. 云南地理环境研究, 2006, 3: 10–14]
- [4] Jung Fuchu, Wu Xihao, Wang Shubing, et al. Characteristics of space distribution of the climate snowline in China [J]. Journal of Geomechanics, 2002, 4: 289–296 [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, 4: 289–296]
- [5] Jiang Zhongxin. Trend surface analysis of the existent snowline in West China. Chinese Geographical Science, 1991, 1(1): 62–69
- [6] Li Jijun, Zheng Benxing, Yang Xijin, et al. Glacier of Tibet [M]. Beijing: Science Press, 1986: 28–30 [李吉均, 郑本兴, 杨锡金, 等. 西藏冰川 [M]. 北京: 科学出版社, 1986: 28–30]
- [7] Shi Yafeng. Overview of Chinese Glaciology [M]. Beijing: Science Press, 1988: 15–18 [施雅风. 中国冰川概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1988: 15–18]
- [8] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm–dry to warm–humid in Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 3: 219–226 [施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 [J]. 冰川冻土, 2002, 3: 219–226]
- [9] Qin Dahe, Ding Yihui, Su Jilan, et al. Assessment of climate environment Climate and environment changes in China (1): Climate and environment changes in China and their projection [J]. Advances in Climate Change Research, 2005, 1(1): 4–9 [秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 等. 中国气候与环境演变评估 (1): 中国气候与环境变化及未来趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 4–9]
- [10] Chen Qian, Chen Tianyu. Climatological analysis of seasonal snow resources in Qilian MT [J]. Geographical Research, 1991, 10(1): 24–38 [陈乾, 陈添宇. 祁连山区季节性积雪资源的气候分析 [J]. 地理研究, 1991, 10(1): 24–38]
- [11] Zhang Jie, Han Tao, Wang Jian. Snow area and snow line altitude change in Qilian Mountains from 1997 to 2004 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(5): 649–654 [张杰, 韩涛, 王建. 祁连山区 1997–2004 年积雪面积和雪线高度变化分析 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 649–654]
- [12] Cai Dihua, Guo Ni, Wang Xing, et al. The Spatial and Temporal Variations of Snow Cover over the Qilian Mountains based on MODIS Data [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(6): 1028–1036 [蔡迪花, 郭妮, 王兴, 等. 基于 MODIS 的祁连山区积雪时空变化特征 [J]. 冰川冻土, 2009, 31(6): 1028–1036]
- [13] Xiao Fei, Du Geng, Ling Feng, et al. Digital Extraction of Snow-line based on Flow Path Analysis [J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(1): 55–67 [肖飞, 杜耘, 凌峰, 等. 基于水流路径分析的雪线数字提取 [J]. 遥感学报, 2010, 14(1): 55–67]
- [14] Hao Xiaohua, Wang Jian, Li Hongyi. Evaluation of the NDSI threshold value in mapping snow cover of MODIS: A case study of snow in the middle Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology

- and Geocryology 2008, 30(1): 132–138 [郝晓华, 王建, 李弘毅. MODIS 雪盖制图中 NDSI 阈值的检验 [J]. 冰川冻土, 2008, 30(1): 132–138]
- [15] Li Sanmei, Yan Hua, Liu Cheng. Study of snow detection using FY-2C Satellite Data [J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(3): 406–413 [李三妹, 闻华, 刘诚. FY-2C 积雪判识方法研究 [J]. 遥感学报, 2007, 11(3): 406–413]
- [16] Yan Hao, Zhang Guoping. Unmixing Method applied to snow boundary estimation [J]. Mountain Research, 2004, 22(1): 110–115 [延昊, 张国平. 像元分解法提取积雪边界线 [J]. 山地学报, 2004, 22(1): 110–115]
- [17] Wang Xing. The Characteristics Research of Satellite-Based Remote Sensing of Snow Qilian Area [D]. Masters Degree Thesis, Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2008: 1–3 [王兴. 基于卫星遥感的祁连山区积雪特征研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2008: 1–3]
- [18] Tian Hongzhen, Yang Taibao, Liu Qiping. Climate change and glacier retreat in Ganggeexiaoheli, middle Qilian Mountains using remote sensing data, 1976–2010 [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment 2012, 7: 41–46 [田洪阵, 杨太保, 刘沁萍. 1976–2010 年祁连山中段岗格尔山合力雪山冰川退缩和气候变化的关系研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2012, 7: 41–46]
- [19] Pu Jianchen, Yao Tandong, Duan Keqin, et al. Mass balance of the Qiyi Glacier in the Qilian Mountains: a new observation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(2): 199–204 [蒲健辰, 姚檀栋, 段克勤, 等. 祁连山七一冰川物质平衡的最新观测结果 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(2): 199–204]
- [20] Gao Qianzhao, Yang Xinyuan. The Features of interior Rivers and Feeding of Glacial Melt-water in the Hexi Region, Gansu Province [G] // Memoirs of Lanzhou institute of glaci ology and cryopedology Chinese academy of science, No. 5. Beijing: Sciences Press, May, 1992. [高前兆, 杨新源. 甘肃河西内陆河径流特征与冰川补给 [G] // 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊, 第 5 号. 北京: 科学出版社, 1992.]
- [21] Wang Ninglian, He Jianqiao, Pu Jianchen, et al. Variations in equilibrium line altitude of the Qiyi Glacier, Qilian Mountains, over the past 50 years [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(32): 3107–3115 [王宁练, 贺建桥, 蒲健辰, 等. 近 50 年来祁连山七一冰川平衡线高度变化研究 [J]. 科学通报, 2010, 55(32): 3107–3115]
- [22] Chen An'an, Chen Wei, Wu Hongbo, et al. The variations of firm line altitude on the Binglinchuan Glacier, Ulugh Muztagh during 2000–2013 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1069–1078 [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]

Relationship Between Sonw Line Change and Climate Change in the Middle of Qilian Mountains during 2000—2012

ZHAO Jun, HUANG Yongsheng, SHI Yinfang, LI Long

(College of geographic and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on snow product (MOD10A2), temperature, precipitation data from 2000 to 2012 and DEM data, using spatial analysis technology and statistical method, this paper analyzes snow line variation trend and its relationship with climate change in the middle of Qilian Mountains, Northwest China. The result shows that: 1) The average elevation values of snow line fluctuated upward trend from 2000 to 2012 in the middle of Qilian Mountains, and the average decline rate is 42.3 m/(10 a). The snow line average height value is above 4 600 m and snow line average height value is 4 673 m in recent 10 years. 2) Both the average elevation values of each aspect snow line and average annual increase rate have obviously consistent characteristics in study area, namely the sunny slope > the southern and northern slope > cloudy slope. 3) The temperature in the warm season and total rainfall in the 6—8 month of 2000—2012 are the important factors to influence the Qilian Mountains snowline changes, the temperature in the warm season is the main factor to induce the snowline. If cumulative rainfall remain stable in the 6—8 month, the temperature in the warm season increasing (decreasing) 1°C will result in snow line altitude rising (falling) 58 m in the middle of Qilian Mountains.

Key words: Qilian Mountains; snow line; climate change; MOD10A2