

# 锡林河流域积雪时空特征及其对径流的影响

郝祥云<sup>1</sup>, 朱仲元<sup>1</sup>, 宋海清<sup>1,2</sup>, 席小康<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区生态与农业气象中心, 呼和浩特 010051)

**摘要:** 寒旱区草原流域地表水资源极为匮乏, 融雪径流是寒旱区草原流域重要的水源, 冰雪融化对河川径流有着十分显著的影响。利用锡林河流域水文站 2000—2013 年逐日径流数据、锡林浩特气象站 2000—2015 年逐日平均气温、降雨、雪深数据及 MOD10A2 积雪产品数据, 分析了锡林河流域积雪面积、雪深年际变化特征, 气象因子与积雪面积、雪深之间的相关性, 以及径流的影响因素。结果表明: 研究区积雪面积、雪深年内变化呈单峰型, 冬季积雪面积、雪深均达到最大值, 春秋次之, 夏季最小。在年际变化上, 积雪面积、雪深总体呈现增加趋势, 其中冬季的积雪面积呈显著性增加。通过研究区气象因子与积雪的相关性表明, 在积雪期, 气温、风速和日照时数是影响雪深和积雪面积的主要因素, 而在融雪期, 气温与降水是影响雪深和积雪面积的主要因素。对径流影响因素的分析可得, 气温对径流的影响最大, 并且积雪面积、雪深与径流之间也存在很强的相关性, 说明积雪的变化也会对径流产生影响。研究积雪动态变化及其对径流的影响对寒旱区草原流域水资源管理、农牧业发展和灾害防御具有重要的现实意义。

**关键词:** 积雪面积; 时空变化; MOD10A2; 径流

**中图分类号:** P343.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2017)06-0360-06

## Temporal and Spatial Variations of Snow Cover and Its Impact on Runoff in Xilin River Basin

HAO Xiangyun<sup>1</sup>, ZHU Zhongyuan<sup>1</sup>, SONG Haiqing<sup>1,2</sup>, XI Xiaokang<sup>1</sup>

(1. College of Hydraulics and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural, Hohhot 010018, China;

2. Inner Mongolia Autonomous Region Center for Ecology and Agrometeorology, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** The snowmelt runoff is an important water resource in the steppe basin in the cold and arid region. The melting of snow and ice has a significant influence on the runoff. We used daily runoff data from 2000 to 2013 for hydrological stations in the Xilin River Basin, average daily temperature, rainfall, snow depth data in Xilinhot Meteorological Station from 2000 to 2015 and MOD10A2 snow product data, to analyze the characteristics of snow cover and snow depth in the Xilin River Basin, the correlation between meteorological factors and snow cover, snow depth, and the influencing factors of runoff. The results show that the snow cover area and snow depth in the study area are single peaks, in winter, snow cover and snow depth all reached the maximum, followed by spring and autumn and minimum in summer. With respect to the interannual changes, the snow area, snow depth showed an overall increasing trend, in which the snow cover area of winter increased significantly. The correlation between the meteorological factors and snow cover in the study area shows that the main factors affecting the snow depth and snow cover are the temperature, wind speed and sunshine duration during the snow cover, in the snowmelt period, the temperature and precipitation are the main factors affecting snow depth and snow cover. The influence of air temperature on runoff is the most significant, and there is also a strong correlation between snow cover, snow depth and runoff, which indicates that the change of snow cover also affects the runoff. It is of great significance to study the dynamic change of snow cover and its influence on the runoff in the grassland drainage area of the cold and arid region, water resources management, agriculture and animal husbandry development and disaster prevention.

**Keywords:** snowfall; spatial-temporal variation; MOD10A2; runoff

积雪作为地球冰冻圈中覆盖面积最大、季节和年际变化最显著的组成部分,对地球气候起着十分重要的调节作用<sup>[1]</sup>。由于积雪具有高反射率、不良热传导等特性,所以积雪的变化会对全球地区地表能量产生影响<sup>[2]</sup>。积雪的时空变化信息是山区与季节性积雪区水文、气象模型的重要输入因子<sup>[3]</sup>,它不仅可以作为流域融雪径流预报模型的输入参数,也可以作为区域性积雪对气候反馈的研究依据<sup>[4]</sup>。在季节性积雪覆盖地区,积雪对气候有着显著的效应,可作为“短期气候预测的信号”<sup>[5-6]</sup>。同时,季节性积雪融水还是我国西北干旱地区极其重要的水资源补给方式<sup>[7]</sup>。但由积雪引起的雪灾、融雪性洪水等灾害的发生,又会给牧区生活、农牧生产带来严重后果。现如今,积雪的分布特征及其随时间的变化已越来越受到国内外学者的关注。如希爽等<sup>[8]</sup>利用1961—2012年中国1400个站点逐日积雪增量、积雪日数资料,发现东北和内蒙古东北部地区积雪量有显著增加趋势,积雪日数的变化趋势均不显著。党素珍等<sup>[9]</sup>利用黑河流域上游1960—2011年降水、气温数据及MODIS积雪产品数据,发现黑河流域上游积雪面积年内分布呈双峰型,近10a积雪面积呈微弱上升趋势。并且发现积雪面积与气温和降水之间存在显著的相关性。韩兰英等<sup>[10]</sup>利用EOS/MODIS、NOAA资料以及气象资料对祁连山积雪面积时间、空间分布及其对气候的响应进行了分析,发现祁连山东段以及中段积雪面积有减少趋势,且祁连山中部雪线高度对降水和气温变化有明显响应。而陆智等<sup>[11]</sup>在对新疆北部地区的融雪洪水的研究中也指出:积雪深度和积雪面积受气候变化影响,若能找出融雪洪水发生的前期气候特征,可有效预测预报融雪洪水。因此,对积雪分布及特征进行研究十分有必要,这对于水资源利用与保护、防洪减灾、大气环流分析以及应对气候变化等具有重要的意义<sup>[12]</sup>。

本文研究的锡林河流域属于我国典型的季节性积雪区,冬季积雪的累积和春季积雪的消融是该流域重要的水文过程。目前,锡林河水库下游的流域已基本断流,上游径流的主要补给来源为降雨补给和春季的融雪补给<sup>[13]</sup>。经统计,锡林河流域春季融雪对径流的补给量占全年径流量的30%以上,锡林河水资源储量与积雪要素(积雪面积、雪深等)之间存在着密切的联系。因此,对锡林河流域积雪要素的研究显得尤为重要。基于此,本文重点研究锡林河流域水库上游积雪面积、雪深的年际变化特征以及与气象因子之间的关系,揭示积雪要素(积雪面积、雪深),气象因子对锡林河流域径流的影响。

## 1 资料处理与分析方法

### 1.1 研究区概况

锡林河发源于赤峰市克什克腾旗敖伦诺尔和呼

伦诺尔,是内蒙古东部高原主要的内陆河。流域位于116°02′—117°12′E, 43°26′—44°08′N。本文研究区位于锡林浩特水文站控制的锡林河上游区域,控制流域面积达3852 km<sup>2</sup>。由于锡林河流域具有特殊的季节性和地理性特点,降水和融雪水成为该地区水资源的主要来源<sup>[13]</sup>。气候特征主要表现为昼夜温差大,蒸发量大。流域多年平均径流深为137.4 mm,常有春汛(融雪水)发生。4月份径流量占全年总径流量的33.62%,6—8月份占全年总径流量的33.26%。

### 1.2 资料选取

锡林河流域内气象站点分布较少,流域内仅有锡林浩特水文站和锡林浩特气象站。本文选取锡林浩特水文站2000—2013年逐日平均径流数据;锡林浩特气象站2000—2015年逐日平均气温、降雨、雪深数据。气象资料数据来源于中国气象数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>);本文所用的积雪面积数据是从美国冰雪数据中心网站下载的经8d合成的MOD10A2积雪产品数据,该数据集空间分辨率为500 m。MODIS反演积雪的方法是根据冰雪的波谱特性,利用归一化积雪指数(NDSI)和近红外通道(波段2)的反射率两个判别标准生成每天的积雪数据<sup>[14-15]</sup>,本文的研究时段为2000—2015年。

### 1.3 多元逐步回归分析模型

多元逐步回归分析是指有两个或两个以上的自变量或者至少有1个非线性解释变量的回归分析,分析模型的表达式为<sup>[16]</sup>

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_K X_K \quad (1)$$

式中: $\beta_0$ 为回归常数; $\beta_1$ 为自变量1的偏回归系数; $\beta_k$ 为自变量k的偏回归系数;k为自变量的数。

## 2 结果与分析

### 2.1 锡林河流域积雪时空分布特征

图1为2015年1—12月锡林河流域上游平均积雪覆盖空间分布情况。由图1可以看出,MOD10A2产品对锡林河流域上游积雪时空分布特征在季节变化上的描述是合理的。在季节上,积雪覆盖比例冬季最大,在1月份研究区基本全部被积雪所覆盖。随着春季的到来积雪开始融化,积雪覆盖比例随之减少,并在夏季的7月、8月全部融化。随着秋季的到来,部分区域有降雪过程,积雪面积开始逐渐增多,最后在冬季恢复到较高水平。2000—2015年期间,流域最大积雪覆盖率范围为94.22%~100%,出现时间多在11月或12月。多年最大积雪覆盖率平均值为98.87%,波动较为平缓。

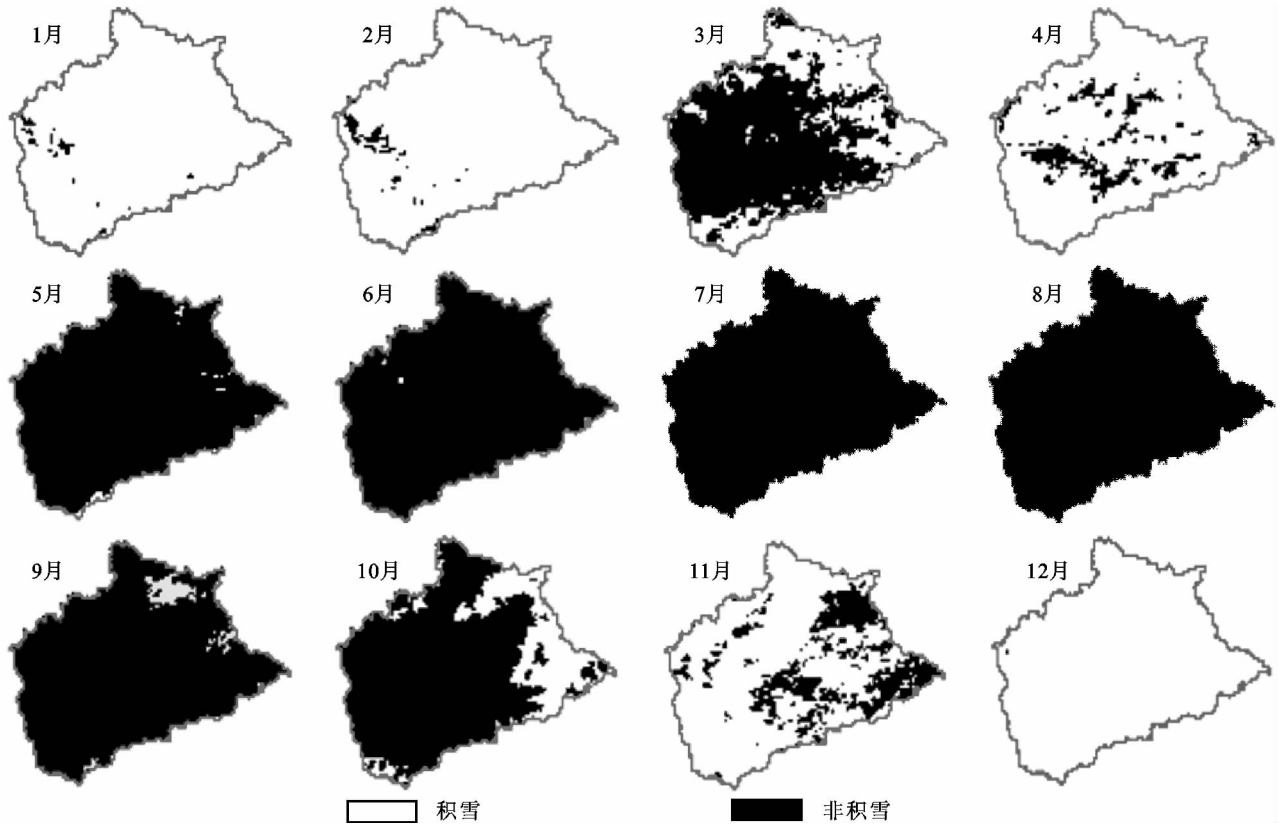


图 1 2015 年 1—12 月锡林河流域上游积雪覆盖变化

2.2.1 积雪覆盖年内变化 将 2000—2015 年 16 a 内每月最大积雪覆盖面积作为当月的积雪面积,得到锡林河流域上游积雪面积年内变化特征,见图 2。由于锡林河流域属于典型的季节性积雪区,冬季是流域降雪积累的主要时期,而夏季积雪则全部消融。所以冬季 3 个月研究区积雪面积均达到 3 000 km<sup>2</sup> 以上,其中 12 月积雪覆盖面积最大,达到 3 368.55 km<sup>2</sup>,此时流域最大覆盖率为 92.99%,几乎全部覆盖。而其他月份如 11 月和 3 月,积雪面积为 2 688.23 km<sup>2</sup>,2 299.47 km<sup>2</sup>。5—9 月份积雪面积均小于 50 km<sup>2</sup>。年内积雪具体过程为:每年 10 月份开始建立积雪,10 月到 11 月份积雪迅速增加,出现明显的上升趋势,到 12 月下旬,1 月上旬达到峰值。进入 2 月份,积雪面积开始减少,从 3 月份以后积雪开始融化,积雪面积迅速减少,到 7 月下旬,8 月上旬,积雪全部消融,面积为零。

2.2.2 积雪覆盖年际变化 选取一年内最大的积雪覆盖面积作为年积雪覆盖面积,得到锡林河流域上游积雪覆盖面积年际变化图(图 3),近 15 a 来,积雪平均覆盖面积为 3.58×10<sup>3</sup> km<sup>2</sup>,总体呈极显著增加趋势( $p<0.01$ )。其中 2003—2008 年、2012—2015 年积雪覆盖面积趋于稳定,无明显波动。

2001 年积雪面积骤然减小,达到 16 a 中的最小值,为 3.41×10<sup>3</sup> km<sup>2</sup>。分析认为,2000—2003 年三年的年平均积雪面积变化与气温和降水的变化密不

可分。选取锡林河 2001—2015 年的年平均气温、年降水量进行趋势分析,发现年平均气温减少而降水量增加。在湿而冷的季节,积雪易于形成与维持,从而积雪面积偏大;在暖而干的季节不利于积雪的形成与维持,积雪面积偏小。积雪面积变化与气温、降水之间的关系,在 2000—2004 年变现最为显著。自 2000 年开始,随着气温的增加、降水量的减少,在气温达到第 1 个峰值的同时积雪面积也减少到第 1 个低峰值。近 50 a 流域气温的下降、降水的增加与流域积雪面积的增加趋势保持一致。

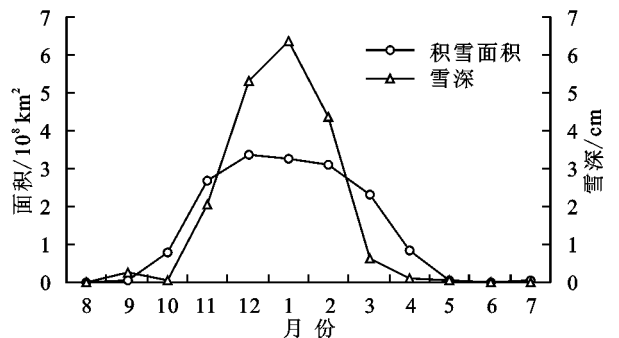


图 2 研究区各月积雪覆盖面积、雪深变化趋势

锡林河流域积雪面积变化随季节更替具有明显的变化特征。选取 2000—2015 年每年、每季积雪覆盖的最大面积最为该年、该季的积雪面积,得到研究区春(3—5 月),秋(9—11 月),冬(12 月—翌年 2 月)季积雪覆盖面积的年际变化趋势(图 4)。由图 4 可

以看出,秋季积雪面积呈线性减小,而春、冬季积雪面积均呈增加趋势。其中春、秋季增加或减小趋势变化不显著( $p>0.05$ ),但积雪面积年际震荡幅度较大,各季节在不同年份均存在明显的突变点。冬季积雪

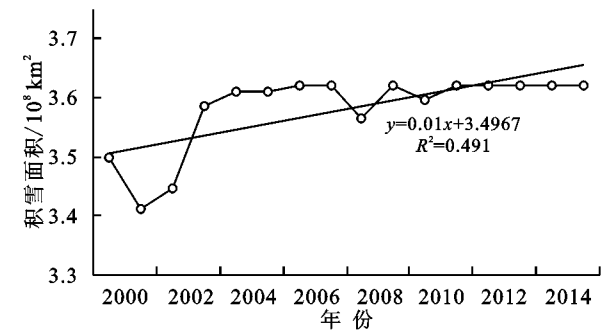


图 3 研究区积雪面积、降水 and 气温年际变化趋势

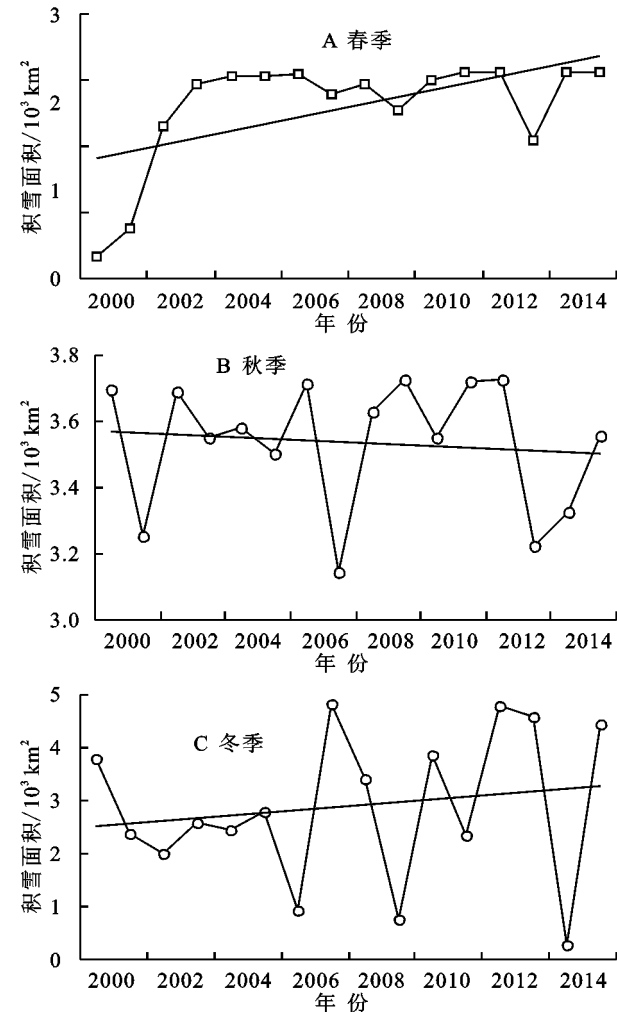
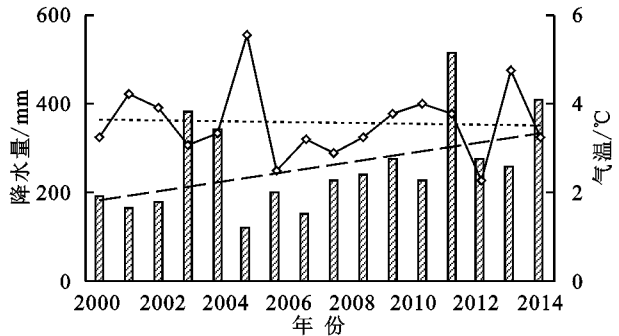


图 4 研究区春、秋、冬季积雪覆盖面积变化趋势

2.2.3 积雪要素时间变化 通过锡林浩特气象站 2001—2015 年逐月雪深资料,分析计算锡林河流域上游积雪期(上一年 10 月至当年 4 月)雪深年际变化特征,见图 5。结果表明,锡林浩特站近 15 a 积雪期年平均雪深为 2.59 cm,其中 2002 年最小(0.14 cm),2013 年最大(9.61 cm)。2003—2008 年的雪深变化相对稳定,介于 1.13~2.05 cm,从 2010 年雪深

面积增加趋势较为显著( $p<0.05$ ),年际震荡幅度相对平稳,只有 2000 年开始到 2004 年积雪面积有明显增加趋势,接下来近 10 a 积雪面积一直保持平稳的增加状态。



开始增加,到 2013 年达到峰值,年最大雪深可达 20 cm。就年际变化而言,积雪覆盖面积的年际变化不大,呈稳定的增加趋势,而雪深年际变化波动较为明显,这是由于近 10 a 锡林河流域积雪面积覆盖率达 90%以上,几乎全流域覆盖,逐年变化相对稳定。而雪深度还受到降雪量、气温等因素影响,故雪深逐年变化趋势显著性大于积雪覆盖面积变化的显著性。从图 2 可以看出,锡林河流域雪深年内分布同积雪覆盖面积均呈单峰值特征,雪深从 10 月份开始出现并持续增加,到 1 月份达到最大值,然后逐渐下降,到 3 月份进入融雪期,4 月份积雪完全消融,达到最小值。雪深的季节变化特点明显,通过分析 2000—2015 年锡林浩特站春(3—5 月),夏(6—8 月),秋(9—11 月),冬(12 月—翌年 2 月)四季雪深变化趋势得出,冬季最大(5.34 cm),春秋季次之(分别为 0.29 cm, 0.79 cm)。积雪从秋季开始积累,冬季达到最大,春季开始融化,夏季完全消融。将四季平均雪深分别与年平均雪深进行了相关分析,其中,冬季雪深的变化对年平均雪深贡献最大,二者相关系数高达 0.968,通过了 0.01 显著性检验,其次是春季和秋季(相关系数分别为 0.590,0.495),由此可见,冬季雪深的变化特征主导了全年积雪深度的变化情况。

2.2 积雪与气候因素的统计分析

将 2000—2015 年积雪期(上一年 10 月至当年 4 月)与融雪期(3 月至 4 月)气温、降水、平均风速、日照时速分别与同期雪深、积雪覆盖面积进行相关性分析,结果见表 1。雪深与气温、平均风速、日照时速在整个积雪、融雪期均呈负相关,其中雪深与气温呈极显著相关,相关系数通过 0.01 显著性水平的检验。这说明,气温是影响雪深的一个重要因素,气温越低,越有利于积雪的积累,从而积雪深度越大。在积雪期,雪深与气温、平均风速、日照时数的相关系数均通过 0.01 显著性水平。说明除气温外,积雪期风速和

日照时数都是影响雪深的重要因素。风速越小、日照时数越短,积雪雪深越大。降水量在融雪期与雪深的相关系数要高于在积雪期,且融雪期降水量与雪深的相关系数通过 0.01 显著性水平。主要是由于在春季,积雪深度更加依赖于降雪量,而降雪量是降水量的重要组成部分,故二者有很好的相关性。分析说明,融雪期影响雪深的主要因素是气温和降水。

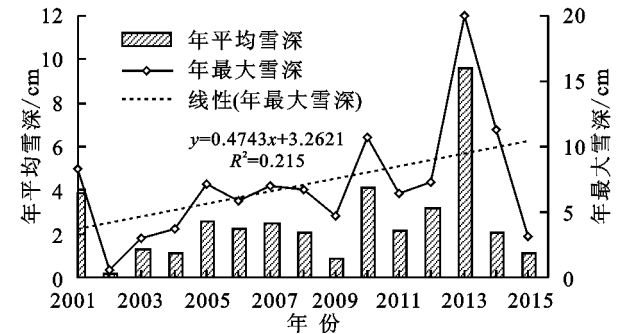


图 5 锡林浩特站积雪期雪深年际变化趋势

在整个积雪期与融雪期,气温与积雪面积均呈极显著负相关关系,即气温低时,有利于积雪的积累与保持,积雪面积较大,而气温高时,积雪面积较小。尤其是在积雪期,二者相关系数高于融雪期。降水量与雪深之间的相关关系在不同时期存在很大差异。在积雪期,积雪面积与降水量呈负相关,在融雪期二者呈正相关关系,且通过了 0.01 显著性水平。积雪期的平均风速、日照时数与积雪面积均呈负相关关系,通过 0.01 显著性水平。由上面的分析可知,在积雪期,积雪面积主要受气温、日照时数、平均风速的影响,并且气温越低、日照时数越短、平均风速越小积雪面积越大。在融雪期,积雪面积主要受气温和降水的影响,降水量越大、气温越低,积雪面积也越大。这是由于,降水在较低的气温条件下是以降雪的形式存在,有利于积雪的增加。在每个时期气温与积雪面积、雪深的相关性绝对值均大于同一时期其他气候因素与积雪面积、雪深的相关性绝对值,由此可见相比降水、平均风速、日照时数,积雪覆盖面积、雪深对气温的变化更加敏感,且积雪面积对气温的敏感性要大于雪深对气温的敏感性,气温是锡林河流域积雪发生变化得主要影响因素。

表 1 锡林河流域雪深、积雪面积与气象因子的相关关系

统计项	雪深		积雪面积	
	积雪期	融雪期	积雪期	融雪期
气温	-0.579**	-0.381**	-0.791**	-0.658**
降水	-0.015	0.190**	-0.243*	0.426**
平均风速	-0.131**	-0.057	-0.401**	-0.359
日照时数	-0.140**	-0.067	-0.498**	-0.193

注: \*\* 相关系数通过 0.01 水平检验; \* 相关系数通过 0.05 水平检验,下同。

2.3 气象因子—积雪—径流的关系

选取 2000—2013 年锡林河水文站径流月数据分

别与同期积雪面积、雪深月数据进行相关性分析可得,在积雪期,径流与雪深、积雪面积的相关系数分别为-0.302( $p<0.01$ ), -0.554( $p<0.01$ ),在融雪期,径流与雪深、积雪面积的相关系数分别为-0.403( $p<0.01$ ), -0.635( $p<0.01$ ),说明径流与雪深、积雪面积均为负相关,且相关性显著,也就是说积雪开始消融时,雪深、积雪面积减小,融雪大量补给径流,导致径流量的增加,所以在每年 4 月份,锡林河流域全年三成以上的径流来源于融雪水。另一方面,从相关程度来看,锡林河水文站径流量的变化与积雪面积的相关程度大于雪深,即积雪面积的变化更能引起径流量的变化。

通过以上分析可知,气象因子不仅对积雪面积、雪深有影响,还会对径流产生影响,并且会通过影响积雪的面积、深度而间接影响径流。为了更好的揭示气象因子、积雪对径流的影响,在相关分析的基础上,选取 2000—2013 年气象因子(气温、降水、平均风速、日照时数),积雪面积,雪深的月数据与同期径流的月数据进行逐步多元回归分析(表 2)。逐步回归基本步骤为:逐个引入可供选择的变量并进行检验,剔除变化不显著的变量,最终得到最优回归方程。

表 2 径流的多元线性回归拟合结果

参 数	回归系数	常数	R <sup>2</sup>
融雪期平均温度	0.852**	0.024**	0.715
积雪期平均温度	0.452**	-0.055**	0.605
积雪期风速	0.553**		

积雪期、融雪期的回归结果表明:锡林河流域融雪期主要发生在春季的 4 月份,在融雪期,气温是影响径流的最大因素。这是由于春季融雪水是河流补给的重要来源,而融雪期间气温则是影响融雪时间、速度的决定因素。在融雪期,伴随着气温的升高,地表大量积雪开始融化,但此时土壤层中依然处于冻结状态,会阻止融雪水的下渗,导致大量融雪水汇入河流,形成春汛。所以说融雪期的气温是影响融雪径流时间、径流量的重要因素。本文将上一年 10 月到来年 4 月作为积雪期,即积雪期主要发生在秋季、冬季以及春季。由于锡林河流域每年冬季(12 月到次年 2 月)河水封冻,径流量几乎为零,气象因子及积雪的变化不会对冬季径流产生很大影响,所以,积雪期径流的变化主要发生在秋季和春季。在积雪期,风速、平均气温对径流的影响最大,而且积雪期风速对于径流的影响要高于积雪期气温对径流的影响。对于积雪期风速而言,风速越大,越不利于降雪的积累,从而促使降雪及时融化补给径流,使径流量增加。总体来看,无论是在积雪期还是融雪期,对锡林河流域径流影响最大的因素是气温,并且积雪面积、雪深也会由

于受到风速、气温等的影响发生变化,从而对径流产生影响。这一结论与前人的研究结论基本保持一致。李倩等<sup>[6]</sup>在对开都河流域径流影响因素分析中表明,在春秋季节,气温、积雪面积对径流影响最大,而降水量在夏季与径流最相关。王鹏等<sup>[17]</sup>在定量分析积雪面积、气温与 KM 河流域融雪径流的关系时指出,在 5—8 月,径流与气温具有较好的同步性,气温升高,积雪开始融化,径流持续增加,反之则减少。刘艳等<sup>[18]</sup>在分析玛纳斯河流域融雪径流特征及其与积雪—气温—降雨的关系中也表明:与降雨相比,融雪期径流量与同期气温、流域积雪面积间具有更密切的相关性。且春季径流量的大小主要取决于春季山区气温的回升率。由此可见,以冰雪融水为主要补给源的流域,气温在春季融雪径流过程中的作用十分重要,直接控制着融雪过程。因此要想有效的做到防洪减灾,防洪部门要特别警惕春季气温的急剧上升。

### 3 结论

(1) 研究区积雪面积年内变化呈单峰型。具体表现为:积雪从每年 10 月份开始建立,冬季达到最大值,之后从 3 月份开始融化,积雪迅速减少,到 7 月下旬,8 月上旬,积雪面积达到最低值。其中积雪面积最大可达 3 368.55 km<sup>2</sup>,此时研究区最大覆盖率为 92.99%,几乎全部覆盖;而雪深具体同样的变化特征,冬季最大,春秋季节次之,夏季完全消融。从年际变化上看,积雪覆盖面积与雪深均呈增加趋势,从季节来看,四季中除秋季积雪面积呈线性减小外,春、夏、冬三季积雪面积均呈增加趋势。

(2) 对研究区积雪面积、雪深与气象因子(平均温度、降水、平均风速、日照时数)的相关性表明,在积雪期,气温、风速和日照时数是影响雪深和积雪面积变化的主要因素,而在融雪期,气温与降水是影响雪深和积雪面积的主要因素。总体来看,相比降水、平均风速、日照时数,在每个时期,气温与积雪面积、雪深的相关性更大,由此可见,气温是锡林河流域积雪发生变化得主要影响因素。

(3) 通过分析研究区径流与积雪面积、雪深的相关性可得,径流与雪深、积雪面积在积雪期和融雪期均为负相关,且相关性为极显著。进一步通过多元逐步回归分析发现,在锡林河流域,气温是影响径流的重大因素,并且积雪面积、雪深也会由于受到风速、气温等的影响发生变化,从而对径流产生影响。

融雪水是寒旱区草原型流域极为重要的水源,研究积雪的时空分布特征对锡林河流域合理规划、利用水资源具有重要意义。本文仅结合遥感数据和锡林浩特气

象站雪深数据对锡林河流域水库上游积雪时空分布特征进行了分析,并没有结合其他辅助资料,而且时间尺度较短。如何提取高分辨率积雪参数来分析较长尺度的积雪时空分布特征,还需进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 蔡迪花,郭锐,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.
- [3] 李震,施建成. 高光谱遥感积雪制图算法及验证[J]. 测绘学报, 2001, 30(1): 67-73.
- [4] 韩庆红,王普才,王玉昆,等. 利用 MODIS 产品分析东北地区积雪覆盖状况及冬季气候特征[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(3): 396-401.
- [5] 万欣,康世昌,李延峰,等. 2007—2011 年西藏纳木错流域积雪时空变化及其影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1400-1409.
- [6] 李倩,李兰海,包安明. 开都河流域积雪特征变化及其与径流的关系[J]. 资源科学, 2012, 34(1): 91-97.
- [7] 娄梦筠,刘志红,娄少明,等. 2002—2011 年新疆积雪时空分布特征研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1095-1102.
- [8] 希爽,张志富. 中国近 50a 积雪变化时空特征[J]. 干旱气象, 2013, 31(3): 451-456.
- [9] 党素珍,刘昌明,王中根,等. 近 10 年黑河流域上游积雪时空分布特征及变化趋势[J]. 资源科学, 2012, 34(8): 1574-1581.
- [10] 韩兰英,孙兰东,张存杰,等. 祁连山东段积雪面积变化及其区域气候响应[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(5): 109-112.
- [11] 陆智,刘志辉,闫彦. 新疆融雪洪水特征分析及防洪措施研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 256-258.
- [12] 李宝富,陈亚宁,陈忠升,等. 西北干旱区山区融雪期气候变化对径流量的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1461-1470.
- [13] 段超宇. 基于 SWAT 模型的锡林河流域融雪径流模拟研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2014.
- [14] 穆振侠,姜卉芳,刘丰. 2001—2008 年天山西部山区积雪覆盖及 NDVI 的时空变化特性[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 875-882.
- [15] 白淑英,史建桥,沈渭寿,等. 卫星遥感西藏高原积雪时空变化及影响因子分析[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(6): 954-962.
- [16] 张建同. 以 Excel 和 SPSS 为工具的管理统计[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [17] 王鹏,穆振侠. KM 河流域融雪径流与积雪面积—气温关系分析[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4): 28-31.
- [18] 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.