

# 锡林河流域融雪径流时间变化特征与成因分析

席小康, 朱仲元, 宋小园, 焦 玮, 隋佳硕

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

**摘 要:**融雪径流是寒旱区草原流域径流的重要补给方式和水源。融雪径流时间随着气象条件的变化而改变,这严重影响着研究区年径流量和季径流量的分配。采用锡林河水文站 1960—2009 年水文年流量质心时间 CT 来表示锡林河水库上游融雪径流开始时间,分析了融雪径流时间变化特征。结果表明:锡林河水文站融雪径流时间具有提前趋势,且融雪径流发生在 3 月末与 4 月初期,锡林浩特气象站融雪期(3—4 月)气温升高或积雪期(上年 10 月—当年 4 月降水量增加,锡林浩特水文站融雪径流时间会提前,但融雪期气温对融雪径流时间作用更明显。由融雪径流时间与年径流量和四季径流量的相关关系,可得融雪径流时间提前,年径流量、冬、夏、秋季径流量均会减小,而春季径流量会增大,但融雪径流时间与年径流量、夏、秋季径流量关系最为密切,相关系数分别为 0.456、0.600 与 0.676。这对寒旱区草原流域合理利用雪水资源和洪水预警有重要作用。

**关键词:**锡林河水库上游;融雪径流时间;径流量

中图分类号:P343.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)06-0150-04

## Time Variation Characteristics and Genetic Analysis of Snowmelt Runoff in Xilin River Basin

XI Xiaokang, ZHU Zhongyuan, SONG Xiaoyuan, JIAO Wei, SUI Jiashuo

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

**Abstract:** Snowmelt runoff is an important supply and source of water of cold and arid regions. The snow melting runoff time will change with the variation of the meteorological conditions, which seriously affect the distribution of annual and seasonal runoffs of the study area. The Timing of the Center (CT) of Mass of Flow of Xilin River Hydrological Station 1960—2009 hydrological year was used to represent the snowmelt runoff start in the upstream of Xilin River Reservoir and analyze the time characteristics of snowmelt runoff. The results showed that the time of snowmelt runoff has earlier trend for Xilin River Hydrological Station, and snowmelt runoff occurred in late March and early April, at the Xilinhot Weather Station, temperature during the snow melting period (March to April) or precipitation during the snow period (last year in October to the April of this year) increased, the time of snowmelt runoff will be ahead, but the effect of the temperature on the time of the snow melting was more obvious. By Pearson correlation coefficients between CT and annual and seasonal runoffs, if the time of snowmelt runoff is in advance, the annual runoff, winter, summer, and autumn runoff will decrease, and spring runoff will increase, but Pearson correlation coefficients between CT and annual runoff, summer and autumn runoff is most closely, correlation coefficient is 0.456, 0.600, 0.676, respectively, which provided an important support in rational use of snow water resources and flood warning in the cold and arid regions prairie watershed.

**Keywords:** the upstream of Xilin River Reservoir; the time of snowmelt runoff; runoff

全球气候变暖导致的融雪径流时间变化已经引起科学界越来越多的关注<sup>[1-5]</sup>。寒旱区草原流域地表水资源极为匮乏,但却是积雪资源较丰富的地区,融雪径流是寒旱区草原流域径流的重要组成部分,积雪

水资源是寒旱区宝贵的淡水资源之一,冰雪融化对流域春、夏河川径流的影响也十分显著<sup>[6]</sup>。季节性积雪对农牧生产也会产生重要影响。同时,如果冬季积雪丰厚,在一定条件下也可能造成灾害,如遇春季持续

收稿日期:2015-11-13

修回日期:2016-01-18

资助项目:国家自然科学基金(50769005;51149006);内蒙古自治区自然科学基金(2013MS0607)

第一作者:席小康(1991—),男,陕西省汉中市人,硕士研究生,主要从事干旱区水资源可持续利用与规划方面的研究。E-mail:354925114@qq.com

通信作者:朱仲元(1956—),男,内蒙古凉城县人,教授,博士生导师,主要从事水文水资源与草原生态等方面的研究。E-mail:731011410@qq.com

升温或大量降雨,积雪急剧融化造成部分地区发生春洪,冲毁农田,阻碍交通,威胁人民的生命财产安全。在干旱区,积雪所产生的融雪径流是异常敏感的环境变化响应因子<sup>[7]</sup>,描述流域径流特征的其中一个重要指标就是融雪径流时间,融雪期降水与气温是影响融雪径流时间的重要因素,而融雪径流时间的改变又会影响到年径流及其季节分配<sup>[6,8-13]</sup>,因此,十分有必要对融雪径流时间进行判定,可依据计算和预测结果向有关防洪、减灾和政府部门提供防灾减灾参考,对及时做好人员、财产等的保护有重要的参考意义。

由于地形、纬度、下垫面条件的差异,流域内各点融雪径流时间过程往往难以直接观测,且时间存在较大的差异。因此,通常采用分析流域出口断面径流序列变化特征来近似获取流域融雪径流时间<sup>[6]</sup>。融雪径流质心时间(The Timing of the Center of Mass of Flow or Center time,CT)是一种计算比较简单,且计算结果相对可靠的方法。同时,CT 对于异常的径流年际变化相对不敏感,能够有效的避免因为统计误差造成的影响,CT 也比较容易用于对处于不同气候带的流域融雪径流时间进行比较。因此,在融雪径流时间的研究中,CT 已被广泛用来近似地表示融雪径流时间<sup>[6,9,12,13]</sup>。

锡林河流域属于蒙古草原上的内陆河流域,目前,以锡林浩特水库为界,锡林河下游已基本断流,锡林河上游径流补给主要来自于夏季降雨补给、春季融雪补给以及地下水补给。经统计分析,在 4 月份,锡林河流域全年三成以上径流来源于融雪。因此,本文重点研究锡林河水库上游地区锡林河水文站点融雪径流时间的变化特征以及发生变化的原因,揭示研究区域内融雪径流时间的变化对年径流及四季径流的影响。

## 1 研究区概况

锡林河属于内蒙古草原典型内陆河,发源于赤峰市克什克腾旗,干流全长 175 km,地理位置在 43°26′—44°39′N,115°32′—117°12′E 之间,自东南流向西北,最终自然消失在查干诺尔湿地<sup>[14]</sup>。本文的研究区位于锡林浩特市锡林河水库上游的锡林河水文站(43°49′24.8″N,116°09′38.5″E)所控制的流域上游区域,水文站的集水面积为 3 852 km<sup>2</sup>。锡林河流域地处寒旱区,具有独特地理气候环境,该地区水资源的主要来源是夏季降雨和春季融雪,大部分水分因强烈的蒸发作用而流失,所以对于草原内陆河流来说,水文站出口的径流量基本代表了该区域水资源的总量,故本文选取锡林河水文站作为流域总的出口断面。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

锡林河流域内气象水文站点分布较少,流域内仅有锡林河水文站与锡林浩特气象站,本文选用锡林河水文站 1960—2009 年水文年(水文年在北半球是从上年 10 月 1 日开始到当年 9 月 30 的时间段,在南半球是从去年 7 月 1 日到当年 6 月 30 日的时间段)月径流量资料,锡林浩特气象站 1961—2009 水文年月平均气温和月降水资料。(后续出现年份均为水文年)。

### 2.2 融雪径流时间计算方法

根据锡林河水文站的月径流序列,计算出每一个水文年中达到年径流质量中心的时间,即流量质心时间 CT,以此来近似的表示融雪径流时间。在本文中,CT 使用的是流量权重时间(Flow-weighted timing)或者叫径流质心(Center of mass of flow)法<sup>[8]</sup>,计算公式如下:

$$CT = \sum_{i=1}^{12} (t_i \cdot q_i) / \sum_{i=1}^{12} q_i \quad (1)$$

式中: $t_i$  是以水文年开始月份(10 月)为第一个月起算的月份或者是以水文年开始第一天(10 月 1 日)起算的天数; $q_i$  表示的是相对应时刻的径流量(m<sup>3</sup>/s);CT 是一个以天或者月为计量单位的数值。文中提到的融雪径流时间即是指 CT。

### 2.3 累积距平法

累积距平法是通过绘制的累积距平曲线图来直观判断变化趋势的一种常用方法,对于序列  $x$ ,时刻  $t$  的累积距平为:

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad (t=1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

式中: $\hat{x}$  为  $t$  时刻累积距平; $x$  为序列取值; $\bar{x}$  为序列平均值; $n$  为序列个数。

### 2.4 数据分析方法

本文中,主要采用累积距平法来分析判断融雪径流时间年际变化特征与趋势。通过皮尔逊(Pearson)相关系数来分析融雪径流时间变化与 PI 和 TI 之间的相关性以及融雪径流时间与年径流量和四季径流量的相关关系。在本文中,采用积雪期(上一年 10 月至当年 4 月)降水量的距平来表示降水指数(PI);用融雪期(3 月至 4 月)平均气温距平来表示气温指数(TI)。

## 3 结果与分析

### 3.1 融雪径流时间变化特征

3.1.1 融雪径流时间年代际变化过程 通过锡林河

水文站 1960—2009 年月径流资料,分析计算锡林河流域水库上游融雪径流时间变化特征,结果表明,从 1960—2009 年以来,锡林河水文站点的融雪径流时间均在 3 月末与 4 月初期(CT 从每年 10 月份为第一个月算起)。其多年平均融雪径流时间为 5.96 月,即 3 月 29 日前后。见图 1,锡林河站 CT 的年代际变化差异明显。70 年代相比于 60 年代融雪径流时间出现延迟趋势,而 80 年代相比于 70 年代与 90 年代融雪径流时间明显提前,分析认为,80 年代锡林河流域融雪期(3—4 月)平均气温较低是其主要原因。从 90 年代后,融雪径流时间提前趋势明显,分析认为主要是融雪期(3—4 月)气温明显升高以及积雪期降水增多所致。21 世纪前 10 a 比 60 年代融雪径流时间提前了 20 d 左右。

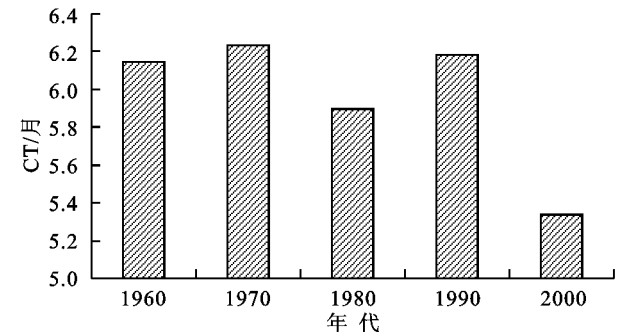


图1 锡林河水文站 CT 年代际变化特征

3.1.2 融雪径流时间年际变化过程 根据累积距平算法,计算出各年融雪径流时间距平与累积距平值,并绘制累积距平曲线图 2。由图所示,从锡林河水文站融雪径流时间累积距平曲线可以看出,1960—2009 年,近 50 a 以来,锡林河流域融雪径流时间分为 4 个阶段:1960—1981 年与 1995—2000 年融雪径流时间增加,融雪径流时间趋于变晚;2000—2009 年融雪径流时间提前趋势明显,该时段平均融雪径流时间早于多年平均融雪径流时间;1981—1995 年融雪径流时间趋向于平稳。

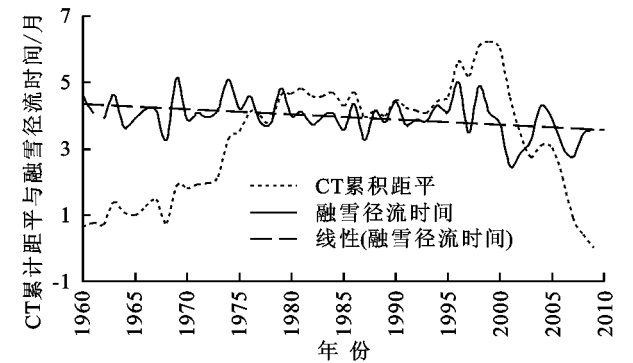


图2 锡林河水文站融雪径流时间与 CT 累积距平曲线

3.2 融雪径流时间变化对径流的影响

流域融雪径流时间的早晚会导致年径流量与各季径流量分配的差异。通过融雪径流时间与年径流

量、冬季径流量(上年 12 至当年 2 月)、春季径流量(3—5 月)、夏季径流量(6—8 月)、秋季径流量(9—11 月)的皮尔逊相关系数来分析融雪径流时间与年径流量和四季径流的相关关系。

由表 1 可以看出,在锡林河水库上游,融雪径流时间 CT 与年径流总量相关关系为正,且在 95% 置信水平上显著,即年径流总量随着融雪径流时间提前而减少推迟而增加。从融雪径流时间与春、夏、秋、冬季径流量的相关系数来看,融雪径流时间与冬、夏、秋季径流量的皮尔逊相关系数均为正,说明融雪径流时间提前,冬、夏、秋三季径流量都会出现减少,但是这种影响在夏、秋季表现尤为突出,都通过 95% 置信水平检验。在春季,融雪径流时间与径流量表现为负相关,即融雪径流时间提前会导致春季流量增加。

从以上分析可以看出,以融雪径流补给为主的寒旱区草原内陆河流域—锡林河流域融雪径流时间的改变与年径流量和各季径流量的大小有密切关系,因此,深入掌握融雪径流时间与径流量相互关系对合理进行水资源管理与优化配置具有重要意义。

表1 锡林河融雪径流时间(CT)与年径流量及四季流量相关关系

参数	年径流量	冬季	春季	夏季	秋季
皮尔逊相关性	0.456**	0.126	-0.136	0.600**	0.676**
显著性(双侧)	0.001	0.383	0.345	<0.001	<0.001

注: \*\* 在 0.01 水平双侧显著相关。

3.3 融雪径流时间对气候变化的响应

流域融雪径流时间的变化是由该区域气象条件所决定,降水和气温的年际差异可能就会导致融雪径流时间的改变,用降水指数(PI)与气温指数(TI)来表示降水与气温对融雪径流时间的影响[8]。通过计算 PI 与 TI 及其累积距平,以及融雪径流时间变化与 PI, TI 的皮尔逊相关系数,分析降水指数和气温指数变化过程以及融雪径流时间变化与 PI, TI 的相关性,从而来探讨锡林河水站融雪径流时间对气候变化的响应。

3.3.1 降水指数与气温指数变化过程 锡林浩特气象站点 PI 与 TI 的累积距平曲线见图 3。从图中可得,1988 年融雪期 3—4 月平均气温发生了突变,突变点前后融雪期平均气温分为两个主要阶段:1961—1988 年融雪期平均气温经历一个降低阶段,29 a 间累积下降了约 3.16℃;1988—2009 年融雪期平均气温经历了一个上升阶段,22 a 间大约累积上升了 3.6℃。锡林浩特气象站积雪期降水量在 1977 年发生了突变,1977 年积雪期降水量仅仅为 18 mm,而 1978 年积雪期降水量却多达 88 mm,相差 60 mm。

从整个 PI 累积图上看,1961—1977 年积雪期降水处于相对稳定阶段;1977—1980 年积雪期降水量连续大于多年平均值;1980—1984 年该时段积雪期平均降水小于多年平均值;1984—1996 年曲线趋势上升,积雪期降水呈增加态势;1996—2006 年积雪期降水量又出现减少趋势;1996 年后积雪期降水出现反弹。

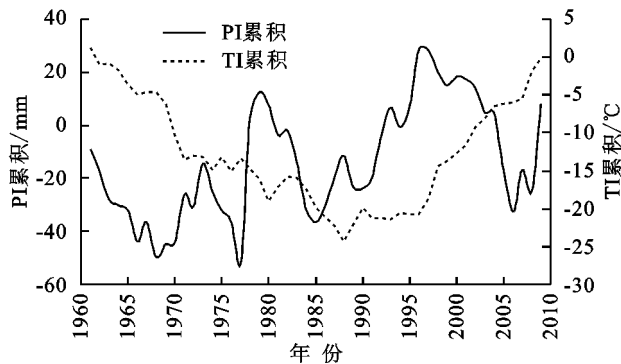


图3 锡林浩特气象站 TI 与 PI 累计距平曲线

3.3.2 融雪径流时间变化与降水指数、气温指数的相关性 通过计算锡林河水文站 1961—2009 水文年融雪径流时间距平与降水指数和气温指数的皮尔逊相关系数可得,锡林河水文站融雪径流时间变化与锡林浩特气象站 PI, TI 的相关系数分别为  $-0.008\ 46$ ,  $-0.170\ 75$ , 不显著, 但均为负相关关系, 也就是说积雪期降水量的增加与融雪期平均气温的升高都会导致融雪径流时间的提前, 反之则会导致融雪径流时间的延迟。另一方面, 从相关程度来看, 锡林河水文站融雪径流时间的变化与 TI 的相关程度大于 PI, 即融雪径流时间变化对融雪期温度更为敏感。

从图 3 以及锡林浩特气象站年 10 月至次年 4 月降水量与 3—4 月平均气温年代际变化, 并结合锡林河水文站融雪径流时间与锡林浩特 PI, TI 的相关性综合分析可得: 锡林河水文站融雪径流时间变化与锡林浩特气象站的相关系数绝对值远远小于其与 TI 的相关系数绝对值, 所以气温比降水量更易导致融雪径流时间的变化; 60 至 70 a 随着融雪期平均气温的降低, 融雪径流时间趋于变晚; 70—80 年代融雪期气温升高, 融雪径流时间提前; 70 年代融雪期气温都低于其他年代, 所以导致该时段平均融雪径流时间是最迟的; 在 2000—2009 年融雪期平均温度是最高的, 平均融雪径流时间也是最早的; 而在 90 年代积雪期降水水平与融雪期气温都相对较高, 但是融雪径流时间却较晚, 分析其原因认为, 首先虽然融雪期 3—4 月平均气温较高, 但 3 月气温相对较低, 4 月气温才出现大幅升高; 其次是降雨不仅可以带来融雪所需热量而且可以破坏积雪结构加速融雪, 但是降雨多集中于 4 月, 双重作用下, 融雪径流时间较晚。

## 4 结论

(1) 锡林河水文站融雪径流时间开始在 3 月末与 4 月初期, 从整体来看, 融雪径流时间具有提前的趋势, 2000—2009 年平均融雪径流时间比 60 年代平均融雪径流时间提前了大约 20 d, 从代际来看, 70 年代融雪径流时间开始最晚, 2000—2009 年融雪径流时间开始最早。

(2) 融雪径流时间与年径流量、冬、夏、秋季径流量正相关与春季径流量负相关, 融雪径流时间提前, 年径流量、冬、夏、秋季径流量会减小, 春季径流会增大, 但融雪径流时间与年径流量、夏、秋季径流量关系最为密切。

(3) 通过计算锡林河水文站 1961—2009 水文年融雪径流时间距平与降水指数和气温指数的皮尔逊相关系数可得, 锡林浩特气象站融雪期(3—4 月)气温升高或者积雪期降水(上年 10 月—当年 4 月)增加, 锡林浩特水文站融雪径流时间会提前, 但与积雪期降水相比融雪期气温对融雪径流时间作用更加明显。

本文采用 CT 表示融雪径流时间是常用的近似表达方式, 缺乏对融雪径流开始时间的准确判断, 故研究建立更为精确的融雪径流时间计算方法和监测技术对以春季融雪补给为主的寒旱区草原内陆河流域水资源的优化利用十分重要。影响融雪径流时间的因素很多, 除了本文分析的降水及融雪期气温外, 积雪区下垫面条件、季节性冻土等都会影响融雪径流开始时间, 全面定性定量分析各因素对融雪径流时间影响情况, 对掌握融雪径流时间变化规律具有重要意义。定量分析不同融雪径流时间对流域径流年内分配影响, 对水资源利用及合理配置具有重要的社会经济价值。

### 参考文献:

- [1] Gleick P H. Regional hydrologic consequences of increases in atmospheric carbon dioxide and other trace gases [J]. Climatic Change, 1987, 10(2): 137-160.
- [2] McCabe G J J, Ayers M A. Hydrologic effects of climate change in the Delaware River basin [J]. Water Resources Bulletin, 1989, 25(6): 1231-1242.
- [3] Aguado E, Cayan D, Riddle L, et al. Climatic fluctuations and the timing of West Coast streamflow [J]. Journal of Climate, 1992, 5(12): 1468-1483.
- [4] Mote P W, Hamlet A F, Clark M P, et al. Declining mountain snowpack in western North America [J]. Bulletin of the American meteorological Society, 2005, 86(1): 39-49.

- [J]. *Journal of Environmental Management*, 2004, 70(1):85-93.
- [2] 张军以, 苏维词, 张凤太. 基于PSR模型的三峡库区生态经济区土地生态安全评价[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(6):1039-1044.
- [3] 杨春红, 张正栋, 田楠楠. 基于PSR模型的汕头市土地生态安全评价[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(3):209-214.
- [4] 吕添贵, 吴次芳, 李冠, 等. 基于生态足迹的港口型城镇土地生态安全研究:以宁波市镇海区为例[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(6):046.
- [5] 关小克, 吴克宁, 王秀丽, 等. 灰关联分析在城市生态安全评价中的应用[J]. *安全与环境学报*, 2008, 8(1):105-108.
- [6] 余摇, 敦摇, 陈文波. 基于物元模型的鄱阳湖生态经济区土地生态安全评价[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10):2681-2685.
- [7] 吕建树, 吴泉源, 张祖陆, 等. 基于RS和GIS的济宁市土地利用变化及生态安全研究[J]. *地理科学*, 2012, 32(8):928-935.
- [8] 李茜, 任志远. 区域土地生态环境安全评价:以宁夏回族自治区为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(5):75-79.
- [9] 郭永杰, 米文宝, 赵莹, 等. 宁夏市域生态安全动态评价及预测[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(2):205-210.
- [10] 马莉娅, 吴斌, 张宇清, 等. 基于生态足迹的宁夏盐池县生态安全评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(5):57-62.
- [11] 丁彩霞, 延军平. 基于PSR模型的宁夏地区生态环境变化特征研究[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(3):191-196.
- [12] 朱志玲, 吴咏梅, 张敏. 基于GIS的宁夏生态环境敏感性综合评价[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(4):101-105.
- [13] 赵源, 王丹, 黄成敏. 基于曲线投影动态聚类的区域土地资源可持续利用评价[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(6):241-246.
- [14] 徐美, 朱翔, 李静芝. 基于DPSIR-TOPSIS模型的湖南省土地生态安全评价[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(5):1265-1272.
- [15] 李玉照, 刘永, 颜小品. 基于DPSIR模型的流域生态安全评价指标体系研究[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 2012, 48(6):971-981.
- [16] 张锐, 郑华伟, 刘友兆. 基于PSR模型的耕地生态安全物元分析评价[J]. *生态学报*, 2013, 33(16):5090-5100.
- [17] 刘鹏飞, 秦耀辰, 赵萌. 基于土地利用变化的郑州市生态安全评价[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(4):324-329.
- [18] 许红红, 李小梅, 张江山, 等. 基于PSR-TOPSIS模型的闽侯县生态安全动态评价[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2013, 8(2):72-79.
- [19] 陈西蕊, 张蓉珍. TOPSIS法在区域生态安全动态评价中的应用:以陕西省为例[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2011, 39(7):177-184.
- [20] 卢涛, 王占岐, 魏超, 等. 基于DPSIR模型的合肥市土地生态安全物元分析评价[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(4):221-227.

~~~~~

(上接第153页)

- [5] Regonda S K, Rajagopalan B, Clark M, et al. Seasonal cycle shifts in hydroclimatology over the western United States[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(2):372-384.
- [6] 吕爱锋, 贾绍凤, 燕华云, 等. 三江源地区融雪径流时间变化特征与趋势分析[J]. *资源科学*, 2009, 31(10):1704-1709.
- [7] Stewart I T, Cayan D R, Dettinger M D. Changes toward earlier streamflow timing across western North America[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(8):1136-1155.
- [8] 李杨, 顾建丽, 张璞, 等. 准噶尔盆地积雪储量的遥感反演及变化特征分析[J]. *干旱区地理*, 2010(4):623-629.
- [9] Stewart I T, Cayan D R, Dettinger M D. Changes in snowmelt runoff timing in western North America under a business as usual climate change scenario[J]. *Climatic Change*, 2004, 62(1/3):217-232.
- [10] Hodgkins G A, Dudley R W, Huntington T G. Changes in the timing of high river flows in New England over the 20th century[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 278(1):244-252.
- [11] Beebe R A, Manga M. Variation in the relationship between snowmelt runoff in Oregon and ENSO and PDO[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40(4):1011-1024.
- [12] Regonda S K, Rajagopalan B, Clark M, et al. Seasonal cycle shifts in hydroclimatology over the western United States[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(2):372-384.
- [13] Maurer E P, Stewart I T, Bonfils C, et al. Detection, attribution, and sensitivity of trends toward earlier streamflow in the Sierra Nevada[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D11):71-81.
- [14] 宋倩, 穆振侠, 姜卉芳. SWAT模型在天山西部山区的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(3):46-49.