

乌鲁木齐河流域积雪面积变化及其对径流的影响

吕姣姣¹, 雷晓云¹, 魏 宾², 任 泉³, 邢 坤¹

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;
2. 新疆生产建设兵团勘测设计院, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 乌鲁木齐市气象局, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要: 积雪面积是干旱区分布式水文模型的重要输入因子, 为了研究其与径流间的关系, 基于MODIS数据提取乌鲁木齐河流域英雄桥站以上积雪面积, 分析了流域近年来积雪面积变化特征, 采用偏相关分析法阐明了降水和气温变化对积雪面积的影响, 并利用多元逐步回归与通径分析研究了径流同积雪面积、降水、气温间的关系。结果表明: (1) 流域积雪面积12月份达到最大, 7月份达到最小, 多年积雪面积变化呈不明显下降趋势; (2) 气温对积雪面积的变化较降水更加敏感; (3) 流域内各因素间的相互影响促进了径流的产生。

关键词: 积雪面积; MODIS; 偏相关分析; 通径分析

中图分类号: TV121 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0852(2016)04-0026-05

积雪是一种极其重要的淡水资源, 其分布最广泛、年际季节变化最为显著, 对地表能量平衡^[1]、水分平衡及径流的产生都具有重要的影响。积雪在气候系统中是影响环境最为活跃的因素, 也是最敏感的气候响应因子^[2-3]。前人研究表明, 西北干旱区出现气候由暖干向暖湿转变的现象^[4], 由此引起了积雪相应的时空变化, 并且对融雪径流产生了一定的影响。积雪面积是干旱区分布式水文模型的一个重要输入因子, 其与径流的关系十分复杂, 大范围的积雪面积减少会改变下垫面对太阳辐射的吸收、反射以及破坏海-气系统的热量平衡状态, 影响大气环流和大范围气候的变化, 如降水、温度等, 进而影响径流的变化。

乌鲁木齐河是一条冰雪融水、降雨及地下水混合补给的河流, 蓝永超^[5]、刘友存^[6]等进行了径流与气象要素间关系的研究, 结果表明: 径流对降水变化的敏感更甚于气温, 气温变化对径流的影响是正负交错的, 降水对径流的影响表现为显著正相关, 但积雪面积与径流关系方面研究甚少。本文基于MODIS数据提取乌鲁木齐河流域英雄桥站以上积雪面积, 分析了流域近年

来积雪面积变化特征, 采用偏相关分析法阐明了降水和气温变化对积雪面积的影响, 并利用多元逐步回归与通径分析研究了径流同积雪面积、降水、气温间的关系, 探讨了它们之间的相互作用, 最终揭示积雪覆盖面积变化对径流的影响。

1 流域概况

乌鲁木齐河流域位于天山北坡中段, 东经 $86^{\circ}45' \sim 87^{\circ}56'$, 北纬 $43^{\circ}00' \sim 44^{\circ}07'$, 西接头屯河流域, 东为板房沟流域。乌鲁木齐河源于天山北坡的喀拉乌成山主峰——天格尔峰, 流向北东北方向, 出山口至乌拉泊水库后折为正北, 穿过乌鲁木齐市, 至米泉县西北消失, 总长214.3km。出山口英雄桥水文站多年平均径流量 $2.441 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[7-8], 冰雪融水占年径流量48.1%, 降雨补给量占37%; 流域内(出山口英雄桥站以上区域)多年平均气温约为 2°C , 气温1月份最低, 7月份最高, 年平均气温呈增加趋势; 年降水量为400~500mm, 降水集中在夏季6~8月雨季, 占全年降水量60%~80%, 年最大降水量出现在7月^[9]。

收稿日期: 2015-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目: 天山中段玛纳斯河流域融雪机理及其径流过程模拟的研究(U1178301); 自治区产学研联合培养研究生示范基地项目(xjaucxy-yjs-20141040); 新疆水利水电工程重点学科基金项目(XJzdxk-2010-02-12)

作者简介: 吕姣姣(1990-), 女, 新疆奎屯人, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源。E-mail: lvjiaojiao1229@163.com

通讯作者: 雷晓云(1961-), 女, 湖南常宁人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源高效利用理论技术教学与研究工作。E-mail: leixiaoyun888@163.com

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文采用的水文气象资料取自乌鲁木齐河流域出山口英雄桥水文站的径流、降水、气温数据,时段均为2000~2014年。积雪资料来自于美国EOS/MODIS数据中心提供的空间分辨率为500m的MODIS/Terra积雪8d合成数据MODIS10A2,时段为2000~2014年。首先利用数据处理工具MRT(MODIS Reprojection Tool)对MODIS10A2数据进行重投影、几何校正、重采样及格式转换处理^[10],统计积雪数据,最后将所有数据整理为月数据进行分析。

2.2 研究方法

由于积雪覆盖区在可见光区域的反射率很高,在短波区域的吸收特征也比较明显。利用归一化雪指数(NDSI)可以有效地将积雪覆盖区域从其他类型的覆盖区域中区别出来。基于MODIS的雪覆盖产品利用MODIS的第4和第6波段的星上反射率(大气纠正之前)计算NDSI,计算方法为:

$$NDSI = (MDCH_4 - MDCH_6) / (MDCH_4 + MDCH_6) \quad (1)$$

式中:MDCH_x为MODIS波段编号x。在计算结果中,如果NDSI的值大于0.4,并且MODIS CH₂的反射率大于11%,则该栅格单元被标识为“雪覆盖区”。然而,如果MODIS CH₄的反射率小于10%,即使其他指标符合条件,此栅格单元也不会被标识为“雪覆盖区”^[11]。

3 结果分析

3.1 积雪面积变化特征

积雪有季节性的特征,积雪面积会随四季的交替而变化。乌鲁木齐河流域四季分为春季(3月~5月)、夏季(6月~8月)、秋季(9月~11月)和冬季(12月~次年2月)。图1为2000~2014年流域月平均积雪面积变化曲线。由图1可知,流域内积雪面积随四季变化有如下规律:流域内积雪面积从9月开始逐渐增加,积雪累积期主要集中在9月~次年3月。11月~次年3月积雪面积比较稳定且12月达到最大值622.04km²。4月份积雪开始慢慢融化进入消融期,于7月积雪面积达到最小值50.48km²。冬季积雪面积最大,占全年积雪覆盖面积的37.65%,夏季积雪面积最小,仅占全年的6.61%,春季和秋季积雪面积介于冬夏两季之间,分别占全年雪盖面积的28.05%和27.69%。乌鲁木齐河

流域2000~2014年积雪面积变化过程线如图2所示。由此可知,近年来,流域内积雪面积总体呈微弱的下降趋势。

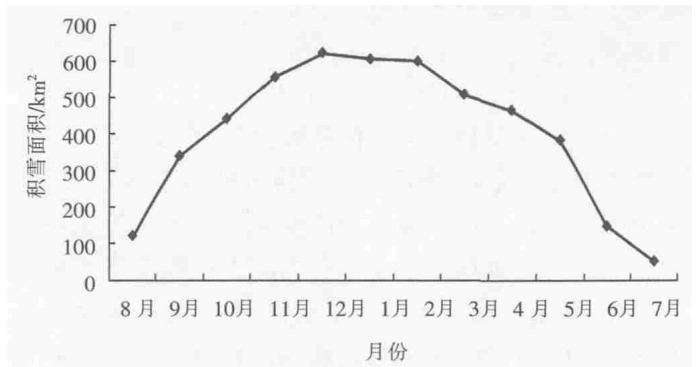


图1 乌鲁木齐河流域2000~2014年月均积雪面积变化
Fig.1 The change of the mean monthly snow-covered area in the Urumqi River basin from 2000 to 2014

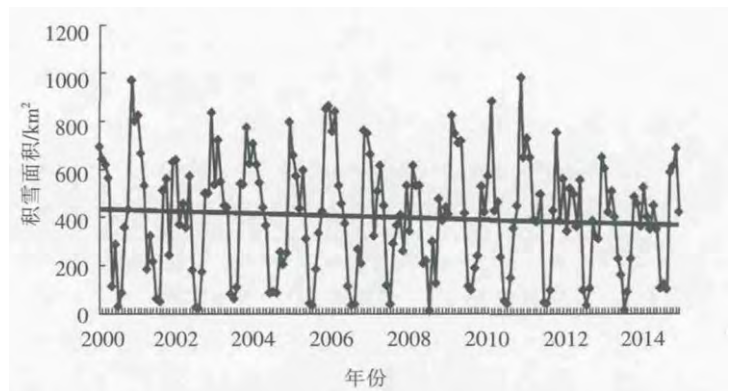


图2 乌鲁木齐河流域积雪面积年际变化过程线
Fig.2 The interannual change of the snow-covered area in the Urumqi River basin

3.2 降水和气温对积雪面积的影响

降水是积雪覆盖的物质基础,气温是积雪覆盖的存在条件。积雪面积的变化与降水和气温的变化息息相关。基于流域内降水量、气温以及同期积雪覆盖面积数据,分析降水和气温与积雪覆盖面积的相关性。

3.2.1 积雪面积与降水量相关分析

利用SPSS软件对积雪面积与降水的关系进行曲线估计,采用的模型分别是线性、对数、逆模型、二次项、立方、复合、幂、S形、增长、指数分布、Logistics,根据相关系数R、决定系数R²、显著性概率Sig对以上模型进行选择,若|R|>0.95则存在显著性相关,|R|≥0.8则高度相关,0.5<|R|<0.8则中度相关,0.3<|R|<0.5则低度相关;|R|<0.3则认为不相关,选取最能反映积雪覆盖面积与降水量关系的方程^[12]。

基于流域内降水量及同期积雪面积数据,以月为

单位,降水量为自变量 X ,积雪面积为因变量 Y ,选取回归系数最大、拟和度最优的拟合方程作为最佳积雪面积与降水量的拟合方程,发现以非线性回归中的三次方多项式模型较其他模型的系数条件要好,得到拟合方程:

$$Y=617.264-9.194X+0.056X^2+0.01X^3 \quad (2)$$

对三次方拟合结果进行分析:相关系数 $R=-0.633$,显著性概率 $Sig=0$,并且通过了显著性水平检验,两者呈中度负相关。说明降水量的变化对积雪面积有一定的影响,降水破坏了积雪原有的形态结构促进了积雪的融化,降水量的增大加速了积雪的融化,积雪面积进而减少。初步认为,流域月均积雪面积与月均降水量之间关系密切,降水量对积雪覆盖的影响较大。

3.2.2 积雪面积与气温相关分析

利用流域月均气温及同期月均积雪面积数据,横坐标为气温,纵坐标为积雪面积,进行曲线估计分析,以回归系数最大和拟合度最优作为选取标准,发现三次方多项式模型模拟最好,得到拟合方程:

$$Y=493.106-9.218X-0.373X^2-0.051X^3 \quad (3)$$

对结果进行分析,三次多项式相关系数 R 达到 -0.792 ,显著性水平概率 $Sig=0$,通过显著性检验,两者表现为高度负相关。说明积雪面积对气温变化敏感度很高,温度升高,积雪融化速度越快导致积雪覆盖面积的减小;反之,温度降低,再加上降雪的到来,积雪覆盖面积会逐渐增加。由此可见,温度升高,积雪融化速率加快,积雪面积减少且出现下降趋势;气温降低,积雪融化速率减缓,加之降雪的出现,导致积雪覆盖面积增大且出现上升趋势。

3.2.3 积雪面积与降水量和气温的相关分析

积雪覆盖面积的变化不可能独立受一种气象因子的影响,考虑到降水在冷暖季的形式不同,以月平均气温通过 0°C 划定冷、暖季^[13],流域内暖季为 4~10 月,冷季为 11 月~次年 3 月。首先,对冷季降水与气温进行相关分析,两者相关性并不高,相关系数为 0.357;对积雪面积、冷季气温进行相关分析,结果表明冷季积雪面积与气温呈低度负相关;与冷季降水呈低度正相关,说明降雪量越多,气温越低,积雪面积越大。湿而冷的冬季有利积雪的形成与维持,暖而干的冬季不利于积雪的形成和维持,在暖湿和冷干两种情况下,积雪变化由降雪量和气温两者影响的大小来决定。

因此,采用偏相关分析法,将气温作为控制因子,进行积雪面积与降水量相关分析,积雪面积与降水量

相关系数为 -0.159 ,两者不相关;当降水量作为控制因子,进行积雪面积与气温相关性分析,积雪面积与气温相关系数达到 -0.603 ,两者表现负相关。

分析表明,当气温不变时,积雪面积与降水量不一定存在相关性,说明降水量的变化不能影响积雪面积的变化情况,当气温较高时,降水的大小不能影响积雪面积的变化情况,当气温较低时,积雪面积的变化可能还会受到其他气象因素的影响;当降水量一定时,只要气温达到维持积雪的范围,气温越低,积雪面积越大,随着温度的降低,积雪面积呈增加趋势。

3.3 径流对积雪面积变化的响应

为了阐明流域内径流与气温、降水、积雪面积之间的关系,采用通径分析法进行研究。将流域内径流数据作为因变量 Y ,同期气温、降水、积雪面积数据分别作为自变量 X_1 、 X_2 、 X_3 进行通径分析。

首先,对因变量 Y 进行正态分布检验,统计量为 0.973,显著性水平 $Sig.=0.690>0.05$,所以因变量 Y 服从正态分布,可以进行回归分析。其次,对各自变量与因变量进行相关分析,得相关性大小排序为 $r_{1y}>r_{2y}>r_{3y}$,且 X_3 与 Y 呈负相关,相关系数分别为 0.760、0.741、 -0.730 。通过简单的相关分析可得到各因素与径流量的相关系数,但这样并不能完整的反映各因素之间的相互作用对径流量的间接影响,使用通径分析法可以弥补其不足,更好的反映出各因素对径流的影响。最后,借助 SPSS 软件分析气温、降水、积雪面积与径流之间的关系,模型汇总见表 1。

表1 模型概述输出结果
Table1 The output results of the model overview

模型	R	R 方	调整 R 方	标准估计的误差
1	0.760 ^a	0.578	0.572	5.185870162511050
2	0.822 ^b	0.676	0.667	4.572695011759890
3	0.834 ^c	0.696	0.682	4.465337261594490

注:a. 预测变量:(常量), 气温;b. 预测变量:(常量), 气温, 降水;c. 预测变量:(常量), 气温, 降水, 积雪面积。

由表 1 可知,随着自变量被逐步引入回归方程的相关系数 R 和决定系数 R^2 在逐渐增大,说明引入的自变量对径流的作用在增加。其中决定系数 $R^2=0.696$,则剩余因子 $e=\sqrt{1-R^2}=0.55136$,该值比较大,说明对径流有影响的因素不仅有气温、降水、积雪面积 3 个,还有一些影响较大的因素没有考虑到,对径流因素的全面分析有待进一步研究。

通径分析中,直接作用系数反映原因变量对于结

果变量的直接影响, 相关系数即为该原因变量对结果变量的直接影响和通过与其相关的其他原因变量的间接影响的代数和^[14]。表达式为:

$$r_{iy} = P_{yi} + \sum_{j=i+1}^n r_{ij} P_{yj} \quad (4)$$

式中: P_{yi} 为自变量与因变量之间的直接作用系数; r_{ij} 为自变量之间的相关系数; $r_{ij} P_{yj}$ 为自变量通过其他自变量对间接途径系数即间接作用系数; r_{iy} 为自变量与因变量之间相关系数。

表 2 给出了各自变量的偏回归系数、方程截距、标准误差、标准系数(即途径系数)以及相对应的显著性检验结果, 从而得到回归方程为:

$$Y = 6.993 + 0.216X_1 + 0.091X_2 - 0.08X_3 \quad (5)$$

由途径系数可看出自变量 X_1 、 X_2 、 X_3 对 Y 的直接作用分别为 $P_{1y}=0.266$ 、 $P_{2y}=0.408$ 、 $P_{3y}=-0.263$ 。显著性检验结果表明, X_1 、 X_2 、 X_3 的偏回归系数显著性均小于 0.05, 说明自变量与因变量间存在显著性差异。

表2 回归系数输出结果
Table2 The output results of the regression coefficients

模型		非标准化系数		标准系数		
		B	标准误差	试用版	t	Sig.
1	(常量)	5.847	0.630		9.286	0.000
	气温	0.617	0.063	0.760	9.786	0.000
2	(常量)	3.056	0.824		3.710	0.000
	气温	0.389	0.075	0.479	5.214	0.000
3	降水	0.094	0.020	0.421	4.586	0.000
	(常量)	6.993	2.050		3.411	0.001
	气温	0.216	0.110	0.266	1.961	0.044
	降水	0.091	0.020	0.408	4.529	0.000
	积雪面积	-0.008	0.004	-0.263	-2.088	0.041

注: 因变量为流量

利用 SPSS 软件进行相关分析, 结果见表 3, 得到各因变量与自变量相关系数为 $r_{1y}=0.760$ 、 $r_{2y}=0.741$ 、 $r_{3y}=-0.730$, 各自变量间相关系数分别是 $r_{12}=r_{21}=0.667$, $r_{13}=r_{31}=-0.846$, $r_{23}=r_{32}=-0.593$ 。由途径分析公式知, $r_{1y}=P_{1y}+r_{12} \times P_{2y}+r_{13} \times P_{3y}=0.760$ (结果与表 3 一致)。

表3 相关系数及检验输出结果
Table3 The correlation coefficient and test output results

		流量	气温	降水	积雪面积
Pearson 相关性	流量	1.000	0.760	0.741	-0.730
	气温	0.760	1.000	0.667	-0.846
	降水	0.741	0.667	1.000	-0.593
	积雪面积	-0.730	-0.846	-0.593	1.000

X_1 通过 X_2 对 Y 的间接途径系数为: $r_{12} \times P_{2y} = 0.272136$, 同理可以计算出其他间接途径系数。简单相关系数、直接途径系数、间接途径系数的关系见表 4。

表4 对径流影响因素的途径分析
Table4 The path analysis of the factors affecting runoff

自变量	相关系数 r	直接作用		间接途径系数(间接作用)			
		p(标准系数)		气温	降水	积雪面积 合计	
气温	0.760	0.266			0.272136	0.222498	0.494634
降水	0.741	0.408	0.177422			0.155959	0.333381
积雪面积	-0.730	-0.263	-0.22504	-0.241944			-0.46698

从表 4 中可以看出变量之间的间接途径系数有正有负, 说明变量之间既有相互驱动又有相互的抑制作用。直接作用系数与间接途径系数的符号一致时, 影响因素之间的间接作用驱动直接影响因素与径流之间的相关性, 而符号相反时则影响因素之间的间接作用抑制直接因素与径流之间的相关性。乌鲁木齐河流域径流变化是气温、降水和积雪面积共同作用的结果, 各个因素间也是相互影响、相互作用的, 气温对径流的影响在降水、积雪面积两者的间接影响下大大提高到 0.760, 降水对径流的影响在其他两因素共同作用下也达到了 0.741, 积雪面积对径流的影响在气温、降水间接影响下由原来 -0.263 提高到 -0.730。由此说明, 气温、降水、积雪面积是流域内驱动产生径流的重要因子, 驱动能力大小依次为气温、降水、积雪面积, 各因素间的相互影响对径流的产生起到了促进作用。

4 结论

基于 EOS/MODIS 资料, 通过对 2000~2014 年乌鲁木齐河流域积雪面积特征分析, 得到以下主要结论:

(1) 流域内积雪面积 12 月份达到最大, 7 月份最小, 多年积雪面积呈不明显的减少趋势。

(2) 降水和气温是影响积雪面积变化的主要因素。较降水来说, 积雪面积对气温更加敏感。当气温一定时, 降水与积雪面积不一定存在相关性; 当降水处在一定情况下, 只要气温达到维持积雪的范围内, 气温越低, 积雪面积越大, 反之亦然。

(3) 乌鲁木齐河流域径流变化是气温、降水、积雪面积共同作用的结果, 气温、降水、积雪面积之间的相互影响对径流量的产生起到了促进作用, 每个因素对径流的影响在其他因素的间接影响下都有很大的提高。

参考文献:

- [1] 李彰俊,郝璐,李兴华. 积雪覆盖度对沙尘暴的影响分析[J].中国沙漠, 2008,(2):338-343.(LI Zhanjun, HAO Lu, LI Xinghua. Impact of snow cover on sand and dust storm [J]. Journal of Desert Research, 2008,(2):338-343. (in Chinese))
- [2] 杨涛,陆桂华,李会会,等. 气候变化下水文极端事件变化预测研究进展 [J]. 水科学进展, 2011,(2):279-286.(YANG Tao, LU Guihua, LI Hui, et al. Advances in the study of projection of climate change impacts on hydrological extremes [J]. Advances in Water Science, 2011,(2):279-286. (in Chinese))
- [3] 董磊华,熊立华,于坤霞,等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展 [J]. 水科学进展, 2012,(2):278-285.(DONG Leihua, XIONG Lihua, YU Kunxia, et al. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology [J]. Advances in Water Science, 2012,(2):278-285.(in Chinese))
- [4] 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,2002,24(3):219-226.(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, 2002,24(3):219-226. (in Chinese))
- [5] 蓝永超,沈永平,钟英君,等. 乌鲁木齐河出山径流对气候变化的敏感性分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2010,11:50-55.(LAN Yongchao, SHEN Yongping, ZHONG Yingjun, et al. Sensitivity of the mountain runoff of Urumqi River to the climate changes [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010,11:50-55. (in Chinese))
- [6] 刘友存,刘志方,郝永红,等. 基于交叉小波的天山乌鲁木齐河出山径流多尺度特征研究[J].冰川冻土, 2013,(6):1564-1572.(LIU Youcun, LIU Zhifang, HAO Yonghong, et al. Multi-time scale characteristics of the runoff in the upstream of Urumqi River, Tianshan mountains, based cross-wavelet transformation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013,(6):1564-1572. (in Chinese))
- [7] 吴素芬,刘志辉,韩萍,等. 气候变化对乌鲁木齐河流域水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2006,(5):703-706. (WU Sufen, LUI Zhihui, HAN Ping, et al. Impact of climate change on water resources of the Urumqi River basin [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006,(5): 703-706.(in Chinese))
- [8] 邵成国.乌鲁木齐河流域径流模拟与水资源利用分析[D].新疆农业大学,2014.(SHAO Chengguo. Urumqi river basin runoff simulation and water resources utilization analysis[D]. Xinjiang Agricultural University, 2014.(in Chinese))
- [9] 李江风.乌鲁木齐河流域水文气候资源与区划[M].北京:气象出版社, 2006.(LI Jiangfeng. Hydrological Climate Resources and Regionalization of the Urumqi River Basin [M]. Beijing: Meteorology Press, 2006. (in Chinese))
- [10] 陆平. 基于MODIS数据的新疆玛纳斯河流域积雪监测与融雪径流模拟[D].北京:中国地质大学,2005.(LU Ping. Snow Monitoring and Snow Melting Runoff Simulation of the Manasi River Basin Based on MODIS Data [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2005. (in Chinese))
- [11] 陈曦.干旱区内陆河流域水文模型[M]. 北京: 中国环境科学出版, 2012:45-46. (CHEN Xi. Arid Area Inland River Basin Hydrological Model [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012:45-46. (in Chinese))
- [12] 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. (DONG Anqing. Study on the Relevance of Snow Cover and Meteorological Factors of Xinjiang Based on Remote Sensing Methods[D]. Xinjiang Normal University, 2009. (in Chinese))
- [13] 刁平,吕斌,杨秀兰. 乌鲁木齐河源地气候与冰川变化特征及其对径流的影响 [J]. 新疆气象, 2000,(1):10-12.(DIAO Ping, LV Bin, YANG Xiulan. Features of climate and glacier change in source of Urumqi River and its effect on runoff[J]. Xinjiang Meteorology, 2000,(1):10-12. (in Chinese))
- [14] 明道绪.通径分析[M]. 雅安: 四川农业大学出版社, 1990.(MING Daoxu. Path Analysis [M]. Ya'an: Sichuan Agricultural University Press, 1990. (in Chinese))

Snow-covered Area Change and Impact on Runoff in Urumqi River Basin

LV Jiaojiao¹, LEI Xiaoyun¹, WEI Bin², REN Quan³, XING Kun¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Bingtuan Investigation and Design Institute in Xinjiang, Urumqi 830002, China; 3. Urumqi Meteorological Bureau, Urumqi 830002, China)

Abstract: The snow-covered area is an important factor of the distributed hydrological model for arid area. In order to study the relationship between snow-covered area and runoff, this paper used the snow-covered area above the Yingxiongqiao station based on MODIS data. The characteristics of the snow-covered area in recent years were analyzed. The effect of precipitation and temperature variation on the snow-covered area was analyzed by using partial correlation analysis. The relationship between runoff and snow-covered, precipitation and temperature was studied by using multiple stepwise regression and path analysis. The results show that (1) the biggest and smallest snow-covered area appear in December and July; (2) the temperature is more sensitive to the change of snow-covered area; (3) the interaction between the various factors in the river basin promote the generation of runoff.

Key words: snow-covered area; MODIS; partial correlation analysis; path analysis