

基于VAR模型的新疆金沟河气象要素与径流关系分析

李艺珍¹, 毛建刚², 张明², 岳春芳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. 新疆水利水电科学研究院, 新疆乌鲁木齐 830049)

摘要: 为探究气候变化下金沟河流域气象要素与径流之间的关系, 根据新疆金沟河流域 2006–2015 年的月平均降水、积雪覆盖率、气温和径流资料, 采用 VAR 模型方法分析了降水、积雪覆盖率、气温变化与径流变化之间的相互响应关系及响应程度。结果表明: 降水、积雪覆盖率、气温与径流之间互相影响, 但径流对降水、积雪覆盖率和气温的影响范围更大; 径流对于降水、积雪覆盖率和气温的冲击响应方向不太一致, 而降水、积雪覆盖率和气温对于径流冲击的响应均具有滞后性; 通过方差分解可知, 除径流自身冲击外, 降水、积雪覆盖率和气温对径流变化的贡献程度依次为: 气温 > 积雪覆盖率 > 降水, 金沟河流域径流的主要影响因素为气温。研究结果可为流域内的各类水文计算提供参考依据。

关键词: VAR 模型; 积雪覆盖率; 格兰杰因果关系; 脉冲响应函数; 方差分解; 新疆金沟河流域

中图分类号: TV121; P463.24 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2020)05-0080-07

Relationship between meteorological elements and runoff in Jingou River Basin of Xinjiang based on the VAR model

LI Yizhen¹, MAO Jiangan², ZHANG Ming², YUE Chunfang¹

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

2. Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumqi 830049, China)

Abstract: The purpose of this paper is to explore the relationship between meteorological factors and runoff in Jingou River Basin under the influence of climate change. Based on the monthly average precipitation, snow cover, temperature and runoff data of Jingou River Basin of Xinjiang from 2006 to 2015, the vector autoregressive (VAR) model was used to analyze the interaction and response mechanism between precipitation, snow cover, temperature and runoff. The results show that precipitation, snow cover, temperature and runoff interact with each other, but runoff has a greater impact on the rest. The response directions of runoff to precipitation, snow cover and temperature shocks are not consistent, whereas the response of precipitation, snow cover and temperature to runoff shocks is lagging. According to the variance decomposition, the contribution of precipitation, snow cover and temperature to runoff change is in the following order, temperature > snow cover > precipitation, excluding the impact of runoff on itself. Temperature is the main influencing factor of runoff in Jingou River Basin. These results can provide some reference for all kinds of hydrological calculations in this basin.

Key words: the vector autoregressive (VAR) model; snow cover; Granger causality; impulse response function; variance decomposition; Jingou River Basin of Xinjiang

1 研究背景

全球气候变化对径流量的影响以及径流量对气

候变化的响应成为了广大学者关注的学术问题。由于水文循环与气候要素变化之间存在相互响应关系, 气候变化通过改变陆面–大气之间的水分、能量

收稿日期: 2019-12-09; 修回日期: 2020-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51569032); 新疆农业大学 2018 年“水利工程”重点学科研究项目(SLXK-YJS-2018-07)

作者简介: 李艺珍(1995-), 女, 四川内江人, 硕士研究生, 研究方向为水文及水资源。

通讯作者: 毛建刚(1971-), 男, 江苏泰兴人, 学士, 高级工程师, 研究方向为水利工程。

交换及传输过程,影响流域的水文过程和径流量的时空格局^[1-2],所以开展径流量与降水、气温等气象要素之间的关系研究对径流量预测、流域水资源管理和可持续开发利用水资源具有重大意义^[3]。

径流对气候变化的响应,既涉及到水循环的研究过程,又是气候变化对水循环影响研究中的关键问题^[4-5]。目前,国内外学者已通过统计方法、分布式水文模型和气候模式等方法定性定量地分析了不同流域内气候变化对径流的影响^[6-7]。如:Moradi等^[8]通过SWAT模型设定3种气候变化情景,发现气候变化背景下伊朗北部 Hyrcanian 森林的地表径流量在雨季(2-5月)明显增加,旱季(7-9月)明显减少;Radchenko等^[9]采用HBV-light模型得出:气候变化情景下,未来锡尔达里亚河的夏季径流将减少12%~42%,冬季春季径流将增加44%~107%;魏光辉^[10]通过偏最小二乘回归模型发现黄水沟流域的温度增加1℃时,年径流量将增加12.8%;降水量增加10%时,径流量将增加4.5%;宋小园等^[11]采用通径分析方法定性分析了气候变化对锡林河流域径流的影响,发现降水、蒸发和有效积温对径流的影响较大。金沟河流域位于天山北坡,积雪和降水是该流域径流的主要补给来源。已有研究表明金沟河流量受气候因素影响较为显著,其中气温是影响金沟河流域径流的主要气象因子,径流与气温正相关,同时气温和降水在特殊年段呈现负相关关系^[12-13]。但在上述研究成果中未考虑到积雪因素对金沟河流域径流的影响,且只是从相关性角度分析了各因素对径流的影响,未揭示降水、气温等单个影响因素变化对径流变化的扰动以及径流在各因素扰动下是如何响应的。

本文利用金沟河流域月尺度上的降水、积雪覆盖率、气温和径流数据,采用基于向量自回归(VAR)模型的格兰杰因果关系检验、脉冲响应函数分析和方差分解方法,从统计学角度分析金沟河流域内降水、积雪覆盖率、气温变化与径流变化之间的相互响应关系及响应程度。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

金沟河流域位于新疆塔城地区沙湾县境内,是玛纳斯河流域的子流域,地跨85°22'~85°44'E,43°55'~44°28'N,流域总面积为2626 km²。金沟河流域的降水量在流域内(空间上)有着明显的差异,山区年降水量为300~700 mm;山前洪积冲积扇缘

区年降水量为250~350 mm;平原区年降水量为150~250 mm^[14]。流域多年平均气温为5.2℃,多年平均最高气温发生在2004年,多年平均最低气温发生在1987年;多年平均蒸发量为1686.8 mm。受气候变化的影响,流域内的多年平均气温和多年平均降水量均呈现增长趋势。流域内的控制水文站——八家户水文站多年平均径流量为3.19×10⁸ m³,其补给水源主要是高山区的冰川积雪融水和地下水。

2.2 数据来源

(1) 积雪数据。积雪数据为采用8日MOD10A2积雪产品合成的积雪覆盖资料,8日MOD10A2数据源于美国航天局NASA(<https://search.earthdata.nasa.gov/>),时间段为2006-2015年,其数据分辨为500 m×500 m。

(2) 水文气象数据。金沟河流域八家户水文站的径流数据来源于石河子水文水资源勘测局。气象资料采用金沟河流域周边4个不同海拔高度的气象站(沙湾、乌苏、炮台、乌兰乌苏)加权平均而来,气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)。为与积雪数据时间长度一致,故水文和气象数据也选取为2006-2015年。

2.3 研究方法

(1) ADF平稳性检验。ADF单位根检验由Dickey等^[15]在1979年提出。对于时间序列 $X = \{x_t\}$,其检验方程为:

$$\Delta x_t = \alpha + \beta_t + \delta x_{t-1} + \sum_{i=1}^m \beta_i \Delta x_{t-i} + \varepsilon_t \quad (1)$$

式中: Δ 为差分运算; t 为时间变量; α 为常数项; β 和 δ 为参数,可由OLS估计法计算; β_t 为趋势项; ε_t 为残差项; i 为滞后阶数, m 为最大滞后阶数。对于上述检验方程,原假设为 $H_0: \delta = 0$,即存在单位根,备择假设为 $H_1: \delta \neq 0$ 。通过OLS法的 t 检验构造如下统计量:

$$\tau = \frac{(|\hat{\phi}_1| - 1)}{S(\hat{\phi}_1)} \quad (2)$$

$$S(\hat{\phi}_1) = \sqrt{S_T^2 / \sum_{i=1}^T X_{t-1}^2} \quad (3)$$

$$S_T^2 = \sum_{i=1}^T (X_t - \hat{\phi}_1 X_{t-1})^2 / (T - 1) \quad (4)$$

式中: $\hat{\phi}_1$ 为 ϕ_1 的最小二乘估计值。

在显著性 $\alpha = 0.05$ 的情况下,若 $\tau \leq 1.96$,则拒绝零假设,时间序列为非平稳序列,反之,时间序列

平稳。若序列检验结果为不平稳,则需要将序列进行差分运算后再检验,如果检验结果仍然为非平稳,再进行一次差分运算,直到检验结果为平稳为止。

(2) 向量自回归模型。向量自回归(VAR)模型是一种被广泛应用的计量经济模型,近年来也常被运用在其他领域,如地理学领域和环境领域^[16-17]。VAR(p)的模型表达式为^[18]:

$$y_t = \Phi_1 y_{t-1} + \Phi_2 y_{t-2} + \dots + \Phi_p y_{t-p} + Hx_t + \varepsilon_t \quad (5)$$

$$(t = 1, 2, \dots, T)$$

式中: y_t 为 k 维内生变量的列向量; p 为滞后阶数; T 为样本数量; $k \times k$ 维矩阵 $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_p$ 和 $k \times d$ 维矩阵 H 为待估计的系数矩阵; ε_t 为 k 维扰动列向量。

① 格兰杰因果关系检验。格兰杰因果关系检验的目的是分析 X 的历史数值是否能解释 Y 的变化。因此,检验之前常设定原假设 H_0 : X 不是引起 Y 变化的格兰杰原因。其估计回归模型如下。

无约束回归模型(u):

$$Y_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^p \alpha_i Y_{t-i} + \sum_{i=1}^q \beta_i X_{t-i} + \varepsilon_t \quad (6)$$

有约束回归模型(r):

$$Y_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^p \alpha_i Y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (7)$$

式中: α_0 为常数项; p 和 q 分别为变量 X 和 Y 的最大滞后期数; ε_t 为白噪声。

再用上述两个回归模型的残差平方和 RSS_u 和 RSS_r 构造 F 统计量:

$$F = \frac{(RSS_r - RSS_u)/q}{RSS_u/(n - p - q - 1)} \sim F(q, n - p - q - 1) \quad (8)$$

根据统计量 F 检验原假设“ H_0 : X 不是引起 Y 变化的格兰杰原因”是否成立。如果 $F \geq F_\alpha(q, n - p - q - 1)$, 则 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_q$ 显著不为零, 拒绝原假设; 否则, 接收原假设。

② 脉冲响应函数分析。脉冲响应函数分析是一类描述系统中每一个内生变量的变化(冲击)对其他内生变量所带来的影响的分析方法, 通过脉冲响应函数分析法能了解一个变量的变化对自身及其他变量之间全面的动态影响。

③ 方差分解。方差分解(variance decomposition)是 VAR 模型中对某一内生变量的预测方差进行归因分析的方法, 可粗略地定量计量出各变量间的影响关系。不同滞后时间内变量的预测方差可以分解为不同冲击解释的部分, 即可获得冲击对变量波动变化的贡献率。

3 结果与分析

3.1 平稳性检验

数据的平稳性是建立 VAR 模型的前提。对降水、积雪覆盖率、气温和径流 4 个时间序列进行月尺度序列 ADF 单位根平稳性检验, 结果如表 1 所示。

表 1 月尺度序列 ADF 检验结果

序列名称	ADF 统计量	临界值(5%)	概率	平稳性
降水	-6.898	-1.962	0.000	平稳
积雪	-8.342	-1.962	0.000	平稳
气温	-6.804	-1.962	0.000	平稳
径流	-1.070	-1.962	0.142	非平稳
径流 ⁽¹⁾	-4.083	-1.962	0.000	平稳

注: 径流⁽¹⁾表示径流一阶差分序列。

根据 ADF 单位根检验原理, 在显著水平为 0.05 情况下, 拒绝单位根假设的概率大于 0.05 则表示序列非平稳。表 1 显示降水、积雪覆盖率和气温序列均拒绝了原假设, 且非平稳概率均小于 0.05, 说明降水、积雪覆盖率和气温序列都是平稳的。月尺度径流序列非平稳概率为 0.142 (大于 0.05), 表示径流序列为非平稳的。为将非平稳径流序列转换为平稳序列, 对径流序列进行了差分计算, 结果显示径流一阶差分序列拒绝了存在单位根的原假设, 则表明径流序列是一阶单整的。

3.2 向量自回归 VAR 模型

建立降水、积雪覆盖率、气温和径流(一阶差分)的 4 变量 VAR 模型, 并进行 AR 特征根检验, 检验结果如图 1 所示。

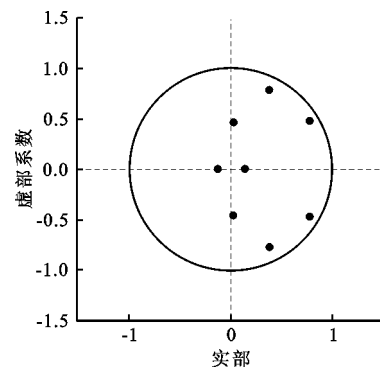


图 1 VAR 模型的 AR 根倒数图

根据 AR 特征根检验原理, 若被检验的 VAR 模型所有根模的倒数均位于单位圆之内, 则所建立的 VAR 模型稳定, 反之, VAR 模型不稳定, 即模型结果无效。由图 1 的 AR 特征多项式根倒数图可以看

出,所有的单位根均在单位圆内,说明建立的降水、积雪覆盖率、气温和径流 4 变量 VAR 模型是稳定的,具备后续分析的前提条件。

3.3 格兰杰因果关系检验

为了探索降水、积雪覆盖率和气温因素与径流之间的关系,分别进行从各因素到径流和从径流到各因素的格兰杰因果关系检验。结合上述平稳性检验结果,降水、积雪覆盖率和气温 3 个变量是平稳的,故可直接进行格兰杰因果关系检验;径流序列为一阶单整序列,故采用其一阶差分序列作为格兰杰因果关系检验的变量。

3.3.1 降水、积雪覆盖率和气温与径流的因果关系分析 由于不同的 VAR 模型滞后阶数对格兰杰因果关系检验结果影响较大,为了兼顾模型的预测效率和自由度,在进行格兰杰因果关系检验时,进行了 1~36 个滞后项检验,检验结果中降水、积雪覆盖率和气温与径流的因果关系如图 2 所示。

根据格兰杰因果关系检验原理,若概率小于显著水平(0.05),则认为拒绝原假设,即存在因果关系。从图 2 中可以看出,降水、积雪覆盖率和气温序

列分别在滞后期为 1~8 个月、2~9 个月、2~9 月和 31~32 个月时概率小于 0.05,表明降水在滞后 1~8 个月时是径流变化的格兰杰原因,积雪覆盖率在滞后 2~9 个月时是径流变化的格兰杰原因,气温在滞后 2~9 个月、31~32 个月时是径流变化的格兰杰原因。同时,也可表明在径流预测中,若加入滞后 1~8 个月的降水序列、滞后 2~9 个月的积雪覆盖率序列和滞后 2~9 个月、31~32 个月的气温序列都能提高其预测精度。

3.3.2 径流与降水、积雪覆盖率和气温的因果关系分析 径流与降水、积雪覆盖率和气温的因果关系检验结果如图 3 所示。图 3(a)中滞后期为 4、7~16 个月时,径流不是降水的因果关系的概率低于 0.05,表明拒绝原假设,即在这个滞后时间段内径流是降水的格兰杰原因。同样地,图 3(b)中滞后期为 1~11、27 个月时和图 3(c)中滞后期为 1~11、15~19 个月时接受原假设的概率小于 0.05,说明在滞后期为 1~11、27 个月时径流是积雪覆盖率的格兰杰原因,滞后期为 1~11、15~19 个月时径流是气温的格兰杰原因。

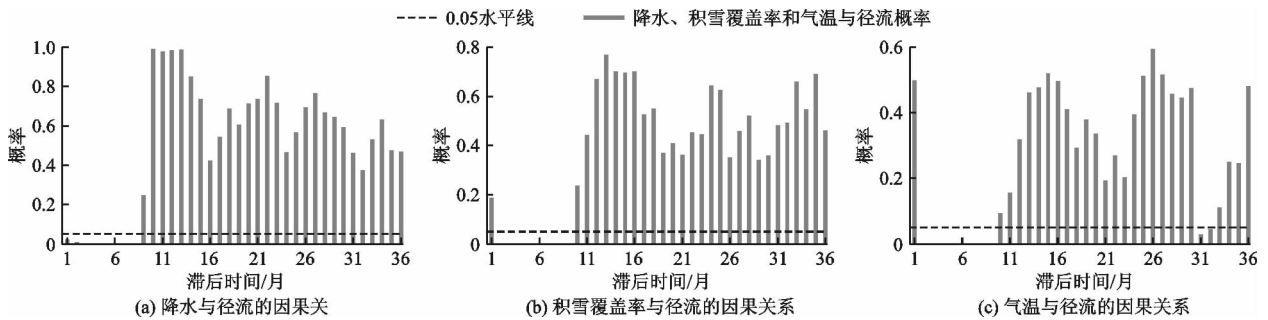


图 2 各因素与径流的因果关系检验结果

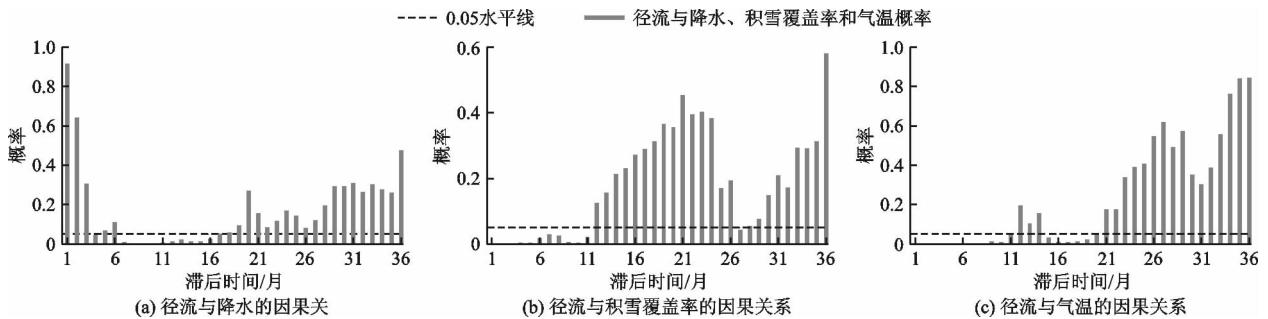


图 3 径流与各因素的因果关系检验结果

综合图 2 和图 3 可知,径流变化与降水、积雪覆盖率和气温变化互相影响,但是在不同滞后尺度上影响有所不同。从拒绝原假设的模型数量来看,径流变化对降水、积雪覆盖率和气温变化的影响范围比降水、积雪覆盖率和气温变化对径流变化的影响

范围大,说明在水文循环中径流对降水、积雪覆盖率和气温的影响作用大于降水、积雪覆盖率和气温对径流的影响作用。

3.4 脉冲响应函数分析

3.4.1 径流对降水、积雪覆盖率和气温的脉冲响应

为分析不同冲击持续时间下径流对降水、积雪覆盖率和气温一个标准差变化后的响应程度,对径流及降水、积雪覆盖率和气温进行了脉冲响应函数分析,结果如图4所示。

图4(a)显示径流对降水变化的响应为:前两个月为较弱的负响应,第3~5个月为积极响应,之后几个月呈现出微弱的正负响应波动现象,最后在第10月时响应程度为 -0.2% ,表明若降水增加 1% ,径流量会呈现出先微弱减小后较大幅度增加,最后波

动至不受降水的影响。

图4(b)显示径流对积雪覆盖率冲击的响应为:先负向响应后正向响应,即积雪覆盖率增大会使径流量先减少后增加。

图4(c)显示径流对气温冲击的响应为:先正向响应后负向响应,即气温升高使径流先增加后减少。

3.4.2 降水、积雪覆盖率和气温对径流的脉冲响应
降水、积雪覆盖率和气温对径流一个标准差变化下的脉冲响应方式和响应程度结果如图5所示。

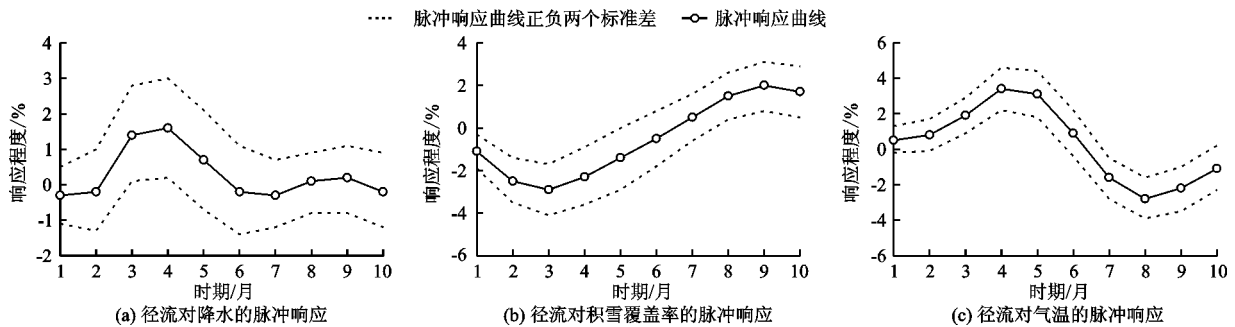


图4 径流对降水、积雪覆盖率和气温的脉冲响应

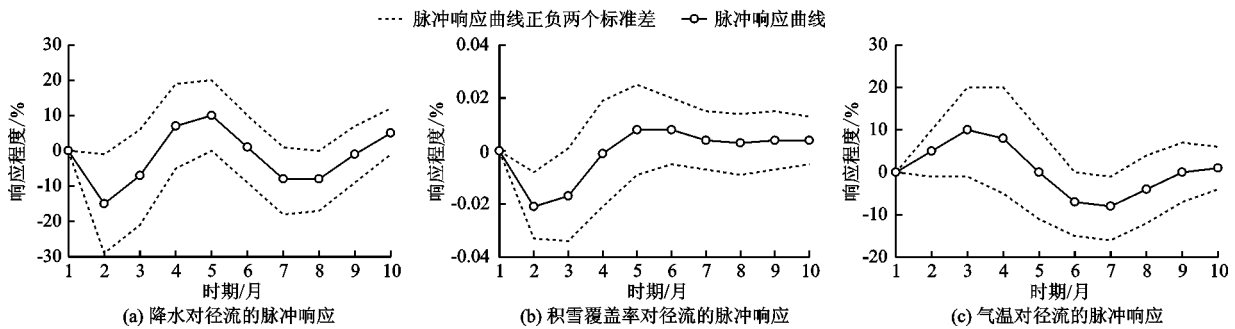


图5 降水、积雪覆盖率和气温对径流的脉冲响应

图5显示3种因素对径流变化的响应在初期均为零。随着滞后期的增大,降水对于径流变化的响应呈现正负响应波动;积雪覆盖率对于径流变化的响应极其微弱,第5个月之前表现为微弱的负响应,5个月之后为微弱的积极响应,最后趋于零响应;气温对径流变化的响应由一开始的积极响应到负响应,最后也趋于零响应。说明径流增加会对降水产生波动反映;对积雪覆盖率的影响极低;会使气温先增加后减小,最后影响逐渐消失。

3.5 方差分解

为了解降水、积雪覆盖率和气温对径流量变化的具体贡献度,采用方差分解技术来确定各因素对径流量变化相对重要性,结果如表2所示。由表2可以看出,随着滞后期的增加,径流量受自身波动冲击的影响程度逐渐降低,降水和积雪覆盖率对径流

量的贡献率均呈现出先增大后趋于稳定的变化规律,而气温对径流量的贡献率逐渐增大。

表2 各因素对径流量变化的贡献率 %

时期/月	降水	积雪覆盖率	气温	径流
1	0.48	6.60	1.52	91.41
2	0.33	19.94	2.39	77.34
3	4.25	30.68	8.88	56.19
4	6.15	27.55	21.38	44.93
5	5.65	25.44	28.88	40.03
6	5.58	25.35	29.28	39.79
7	5.37	24.31	30.51	39.81
8	4.87	24.12	34.77	36.25
9	4.48	25.37	36.14	34.00
10	4.30	26.56	35.41	33.73

此外,由表2还可看出,对径流变化的相对贡献程度依次为:气温 > 积雪覆盖率 > 降水。这一现象的水文意义说明,气温的波动直接影响着降水波动和积雪形成波动,从而间接地影响着径流变化;此外,在降水和积雪覆盖率中,积雪覆盖率对径流变化

的贡献率更高,说明研究区的径流主要由融雪补给为主,降水为辅。

为探究降水、积雪覆盖率和气温相互之间的关系以及径流对三者的影响,分别对4个变量进行方差分解,结果如图6所示。

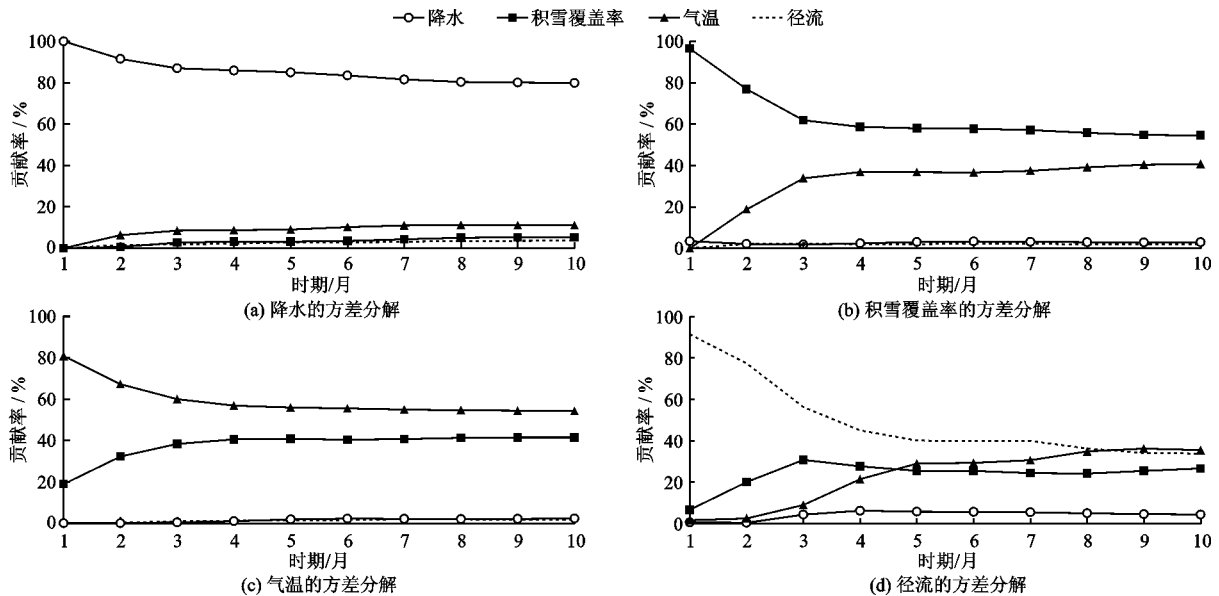


图6 各因素的方差分解结果

由图6中可以看出,气温变化对积雪覆盖率波动的贡献率要高于对降水变化的贡献率(图6(a)、6(b)),说明在径流方差分解结果中(图6(d))气温波动之所以对径流变化有较高的贡献率,是因为气温直接影响着积雪覆盖面积从而间接地影响径流的变化。同时,图6(a)~6(d)4图均可说明对4个变量波动影响最大的是自身的波动冲击,也可说明径流变化对降水、积雪覆盖率和气温的波动影响相对最小。

4 讨论

根据方差分解结果得出对金沟河流域径流变化影响最大的因素是气温,这与董奎等^[19]得出的结论相一致。孟现勇等^[20]对天山北坡中段融雪径流进行了敏感性分析,结果发现温度变化对于融雪径流的影响较降水对融雪径流的影响大。本研究验证了VAR模型在径流变化与降水、积雪覆盖率和气温变化关系分析中的适用性。

随着近百年来全球气候变化,我国气温增暖明显,特别是近50年来年平均地面气温升高了 1.1°C ,升温速率接近 $0.22^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ^[21]。金沟河流域位于天山北坡,属山区高寒地带,流域内径流的主要补给源——冰川对气温变化极为敏感。上述研究结

果表明,若气温增加,径流在一定的滞后期内也呈增加趋势;且随着滞后时间的增加,气温对径流变化的贡献率也逐渐增大。虽然金沟河流域的径流量在一定滞后时间内将增加,但流域内的冰川储量将减少,引起新的水资源及生态环境问题。

除了降水、积雪覆盖率、气温之外,径流变化还与地下水位、潜在蒸发量^[22]和土地利用与土地覆盖变化(LUCC)^[23]等因素有密切的关系。此外,由于数据资料的限制,获得的研究区积雪覆盖率数据时间序列仅有2006-2015年共计10a,本研究也只分析了月尺度上径流变化与各因素变化之间的相互关系,没有涉及季尺度和年尺度上的分析。因此,对于不同时间尺度上更多因素与径流之间的关系分析有待进行更深入地研究。

5 结论

本文引入VAR模型理论,对月平均降水、积雪覆盖率、气温和径流进行了ADF单位根检验、格兰杰因果关系检验、脉冲响应函数分析和方差分解,主要结论如下:

(1)降水、积雪覆盖率、气温和径流4个变量的ADF检验结果表明,降水、积雪覆盖率和气温序列是平稳序列,径流序列为一阶单整的非平稳序列,可

构建降水、积雪覆盖率、气温和径流一阶差分的VAR模型。

(2)从格兰杰因果关系检验结果来看,径流变化与降水、积雪覆盖率和气温变化在不同滞后期内互相影响。但径流对降水、积雪覆盖率和气温的影响大于降水、积雪覆盖率和气温对径流的影响。

(3)径流对降水冲击的响应呈波动衰减特征,对积雪覆盖率的响应为先负向响应后正向响应,对气温冲击的响应为先正向响应后负向响应。降水、积雪覆盖率和气温对于径流量变化的响应均具有滞后性(当月无响应),降水和气温对于径流冲击的响应具有波动衰减特征,而积雪覆盖率对径流冲击响应程度极小。

(4)从方差分解结果来看,除径流自身冲击的影响外,对径流变化贡献率最大的是气温,其次是积雪覆盖率,最后是降水,其中贡献度最大的气温主要是通过影响积雪覆盖面积从而间接影响径流的变化。

参考文献:

- [1] 吕继强,沈冰,李怀恩,等. 径流对气候变化的响应研究——以黄河上游河源区为例[J]. 水力发电学报, 2015,34(4):191-198.
- [2] 王蕊,姚治君,刘兆飞,等. 雅鲁藏布江中游地区气候要素变化及径流的响应[J]. 资源科学, 2015,37(3):619-628.
- [3] 王国庆,张建云,鲍振鑫,等. 人类活动和气候变化对岚河流域河川径流的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019,38(6):113-118.
- [4] 张喜凤. 黑河上游气候变化对出山口径流的驱动分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014,23(4):542-548.
- [5] 李卓仑,王乃昂,李育,等. 近50年来黑河出山径流对气候变化的响应[J]. 水土保持通报, 2012,32(2):7-11+16.
- [6] 高超,陆苗,张勋,等. 淮河流域上游地区径流对气候变化的响应分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016,37(5):28-32.
- [7] 丁相毅,周怀东,王宇晖,等. 三峡库区水循环要素现状评价及预测[J]. 水利水电技术, 2011,42(11):1-5.
- [8] MORADI H R, ABBASPOUR K C. Climate change impacts on surface runoff in the Hyrcanian Forests[J]. International Journal of Engineering and Technical Research, 2017,7(6):29-35.
- [9] RADCHENKO I, DERNEDDE Y, MANNIG B, et al. Climate change impacts on runoff in the Ferghana Valley (Central Asia)[J]. Water Resources, 2017,44(5):707-730.
- [10] 魏光辉. 气候变化对新疆黄水沟流域径流过程的影响[J]. 浙江水利水电学院学报, 2015,27(1):46-52+57.
- [11] 宋小园,朱仲元,张圣微,等. 气象因素对锡林河融雪径流影响的通径分析[J]. 中国水土保持科学, 2016,14(5):74-81.
- [12] 韩舜滨. 近30年金沟河流量变化与气候因子相关性分析[J]. 新疆水利, 2017(2):31-35.
- [13] 覃姗,岳春芳,何兵,等. 金沟河流域水文气象要素关系变异诊断[J]. 水资源与水工程学报, 2019,30(2):50-56.
- [14] 刘红雷. 浅谈金沟河渠首漏斗及涡管排沙原型水文分析[J]. 水利科技与经济, 2011,17(3):21-22+30.
- [15] DICKEY D A, FULLER W A. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root[J]. Journal of the American Statistical Association, 1979,74(366a):427-431.
- [16] 赵娟,穆兴民,高鹏,等. 基于VAR模型分析径流对降水和水土保持措施响应[J]. 泥沙研究, 2017,42(4):37-44.
- [17] 吴文洁,解竹青. 基于协整理论的榆林煤炭开采区生态环境演化进程分析[J]. 西安石油大学学报(社会科学版), 2013,22(5):1-6.
- [18] 星焱. 我国西部金融与财政支农的经济效应研究[D]. 成都:西南财经大学, 2010.
- [19] 董奎,刘兵,郑旭荣. 金沟河流域气温、降水与年径流量演变规律研究[J]. 人民黄河, 2010,32(5):32-33.
- [20] 孟现勇,吉晓楠,孙志群,等. 天山北坡中段融雪径流敏感性分析——以军塘湖流域为例[J]. 水土保持通报, 2014,34(3):277-282.
- [21] 武胜利,刘强吉. 近50a新疆巴州地区气温与降水时空变化特征[J]. 干旱气象, 2016,34(4):610-616+692.
- [22] 黎清霞,李佩怡,何艳虎,等. 澜沧江流域中下游主要水文气象要素变化相关性分析[J]. 灌溉排水学报, 2018,37(9):100-107.
- [23] 金鑫,金彦香,杨登兴. 基于LU-SWAT模型的土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究——以黑河上游为例[J]. 灌溉排水学报, 2019,38(5):114-121.