

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0148

赵娜娜,王贺年,于一雷,等.基于Budyko假设的若尔盖流域径流变化归因分析[J].南水北调与水利科技,2018,16(6):21-26.
ZHAO N N, WANG H N, YU Y L, et al. The attribution analysis of streamflow changes in the Zoige basin based on the Budyko hypothesis[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 21-26. (in Chinese)

基于 Budyko 假设的若尔盖流域径流变化归因分析

赵娜娜^{1,2,3}, 王贺年^{1,2}, 于一雷^{1,2}, 徐卫刚^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院 湿地研究所, 北京 100091; 2. 湿地生态功能与恢复北京市重点实验室, 北京 100091;
3. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 变化环境下的水文循环研究是当今水科学研究的热点之一, 研究流域水文过程变化的响应机制, 对未来流域水资源规划及管理具有重要的现实意义。以若尔盖流域为研究区域, 基于 Budyko 假设理论, 应用敏感性分析方法, 对若尔盖流域径流变化进行归因分析, 结果表明: 若尔盖流域径流对降水、潜在蒸散发和流域特征参数的敏感性系数分别为 0.645 1、-0.234 7 和 -182.205 0, 即若尔盖流域降水每增加 1 mm 将导致流域径流增加 0.645 1 mm, 潜在蒸散发每增加 1 mm 将导致流域径流减少 0.234 7 mm, 流域特征参数每增加 1 将导致流域径流减少 182.205 0 mm; 若尔盖流域逐年径流呈明显的下降趋势, 与基准期(1960-1990年)相比, 变化期(1991-2011年)径流量减少了 56.23 mm (20.48%), 其主要影响因素为流域下垫面特征的变化, 其贡献率可达 93.46%, 而气候变化的影响仅占 5.57%。

关键词: 若尔盖流域; 径流; 气候变化; 流域特征参数; 归因分析

中图分类号: P467 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The attribution analysis of streamflow changes in the Zoige basin based on the Budyko hypothesis

ZHAO Nana^{1,2,3}, WANG Henian^{1,2}, YU Yilei^{1,2}, XU Weigang^{1,2}

(1. Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Beijing Key Laboratory of Wetland Services and Restoration, Beijing 100091, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The hydrologic cycle research under changing environment is one of the hot topics in water science study. The study on the response mechanism to hydrological process changes is of great practical significance to future water resources planning and management. In this study, based on the Budyko hypothesis, we conducted attribution analysis of the streamflow changes in the Zoige basin by sensitivity analysis, and the results showed that: the sensitivity coefficients of streamflow to precipitation, potential evapotranspiration, and catchment characteristic parameter were 0.645 1, -0.234 7, and -182.205 0, respectively, which means that every 1 mm increase in precipitation would induce a 0.645 1 mm increase in streamflow; every 1 mm increase in potential evapotranspiration would induce a 0.234 7 mm decrease in streamflow; every increase of 1 in the catchment characteristic parameter would induce a 182.205 0 mm decrease in streamflow. The streamflow of the Zoige basin showed a significantly decreasing trend. Compared with the reference period (1960-1990), the streamflow of the change period (1991-2011) decreased by 56.23 mm (20.48%). The main influence factor was the change of underlying surface characteristics, whose contribution rate reached 93.46%. The climate change only contributed 5.57%.

Key words: the Zoige basin; streamflow; climate change; catchment characteristic parameter; attribution analysis

收稿日期: 2018-04-28 修回日期: 2018-08-20 网络出版时间: 2018-09-20

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180918.1151.002.html>

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFINT2015K06); 国家自然科学基金(51609243); 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金(IWHR-SKL-201612p)

Funds: National Nonprofit Institute Research Grant from CAFINT (CAFINT2015K06); National Natural Science Foundation of China (51609243); Open Research Fund of State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR-SKL-201612p)

作者简介: 赵娜娜(1985), 女, 河南灵宝人, 助理研究员, 博士, 主要从事水文及水资源、湿地生态水文学方面研究。E-mail: amazhao2009@163.com

通讯作者: 王贺年(1989), 男, 山东济南人, 助理研究员, 主要从事流域水文方面研究。E-mail: wanghenian2006@126.com

全球变化环境下的水文循环研究是当今流域水文学研究的热点之一^[1-2],近 50 年来,中国各大流域的河川径流量均呈明显的下降现象,这已引起管理部门和公众的广泛关注,研究流域径流变化的响应机制,对流域水资源规划及管理具有重要的现实意义。近些年来,各国学者在流域径流变化归因分析等方面进行了大量研究^[3-7],大多数研究均采用分布式水文模型的方法,但是需要在模型校准和参数率定上耗费大量的精力^[8-9]。Budyko 假设理论的敏感性分析是近年来兴起的研究气候变化影响流域径流的一个新的视角^[10],为探索流域径流演变的驱动机制提供了更简便的途径。

若尔盖高原湿地是青藏高原湿地的典型代表,是气候变化的敏感区和脆弱区,也是世界上海拔最高、面积最大的高原泥炭沼泽的主要分布区之一;同时其作为黄河源区的重要生态系统,也是黄河上游流域水安全和生态安全的重要屏障,流域湿地水文情势演变及其对生态环境变化和响应备受关注。近几十年来,由于人类活动干扰、全球气候变暖等因素的共同影响,若尔盖湿地面积在不断减少,仅 1975 年到 2001 年的 26 年间,沼泽湿地、湖泊湿地、河流湿地分别萎缩了 20.2%、34.48%、48.03%,而沙化地却增长了 351.81%,湿地生态环境遭到严重破坏,对黄河上游源区的水源涵养、区域生态平衡、湿

地资源保护和可持续利用构成了严重的威胁。

本研究以若尔盖流域为研究区域,基于 Budyko 假设理论,应用敏感性分析方法研究气候变化与流域下垫面特征变化对流域径流变化的影响,明确各自的影响量和贡献率,旨在为若尔盖流域水资源管理提供参考。

1 研究区概况

若尔盖流域位于川西高原北端的阿坝藏族羌族自治州境内(101°37′ - 103°25′ E, 32°10′ - 34°06′ N),跨阿坝、红原和若尔盖 3 个县。流域地处青藏高原东缘,属大陆性高原寒温带湿润半湿润季风气候,雨热同期,干湿季节分明。流域海拔 3 400 mm 以上,地势西南高东北低,河沟纵横,湖泊、沼泽、草甸遍布,主要河流为黑河、白河等,主要土壤类型为棕壤、草甸土、沼泽土等。由于若尔盖湿地没有设置入流水文站点,缺少入流水文资料,本研究以黄河上游吉迈水文站作为流入湿地的径流控制点,以玛曲站作为流出湿地的径流控制点,对吉迈水文站和玛曲水文站之间的集水流域(简称“吉迈—玛曲流域”,面积为 38 122 km²,以下简称“若尔盖流域”)作为研究区域,对流域 1960—2011 年的径流变化进行分析,将位于流域东部的黑河、白河以及玛曲流域组成的若尔盖沼泽湿地(以下简称“若尔盖湿地”)作为重点研究区域(图 1)。

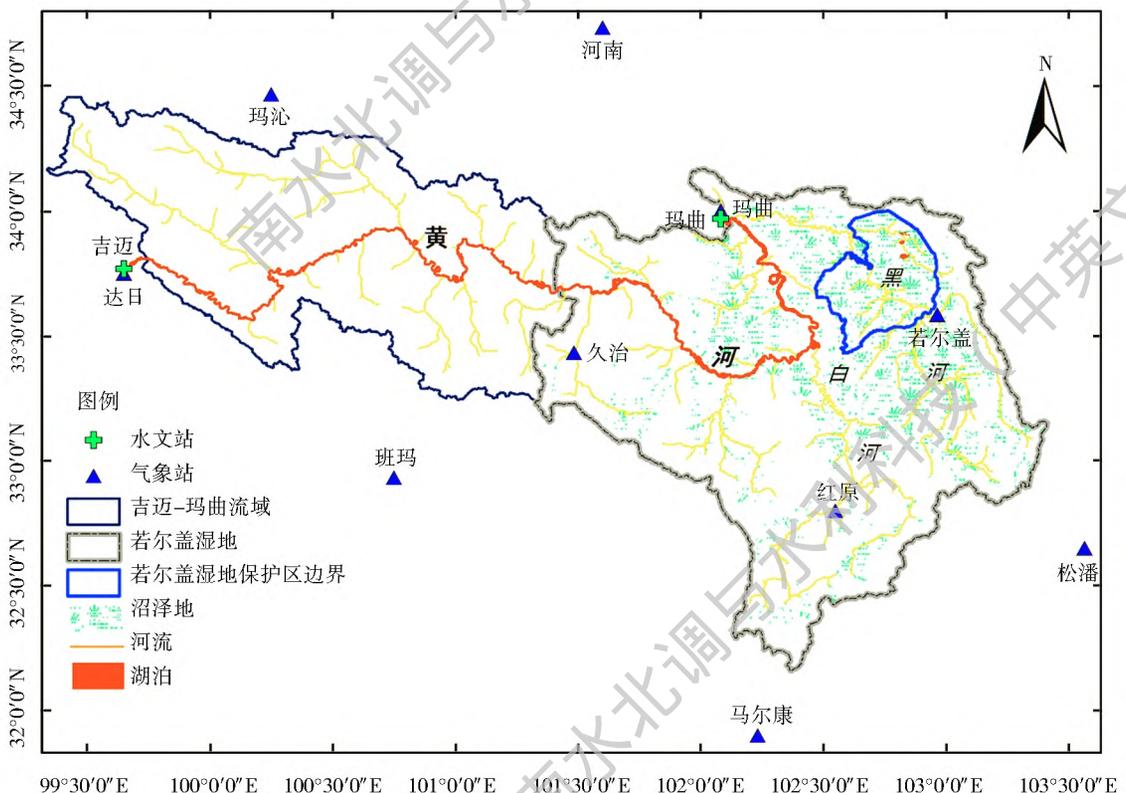


图 1 若尔盖流域及水文站和气象站位置

Fig. 1 The locations of Zoige basin, hydrological stations, and meteorological stations

2 研究方法

2.1 Budyko 假设理论

Budyko(1974)^[11]认为流域多年平均蒸散发是由大气对陆面的水分供给(降水)和蒸发能力(净辐射或潜在蒸散发量)决定的,蒸散发量是两者之间的函数,其可简单的表达为:

$$\frac{E}{P} = f(E_0/P) \quad (1)$$

式中: E 为流域实际蒸散发量(mm); P 为降水量(mm); E_0 为流域潜在蒸散发量。

我国气候学家傅抱璞教授(1981)^[12]根据流域水文气象的物理意义提出了一组 Budyko 假设的微分形式,通过量纲分析和数学推导,得出了 Budyko 假设的解析表达式:

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - \left[1 + \left(\frac{E_0}{P} \right)^\omega \right]^{1/\omega} \quad (2)$$

式中: ω 为流域下垫面特征参数,能够反映流域下垫面状况,与流域土地利用、植被、土壤等相关^[13-15]。

由此, Budyko 假设理论可发展为考虑流域特征的一个综合表达式:

$$\frac{E}{P} = f\left(\frac{E_0}{P}, \omega\right) \quad (3)$$

2.2 流域径流影响因素的敏感性分析

参考弹性系数概念^[16],本研究提出一个相似的参数为敏感性系数,能够反映每单位因变量参数(X)变化引起的流域径流变化量($\partial Q/\partial X$)。

基于长时间序列的水量平衡公式 $P = E + Q$, 式(2)可以推导为径流 Q 的模拟公式:

$$Q = [P^\omega + E_0^\omega]^{1/\omega} - E_0 \quad (4)$$

基于式(4),应用微积分求偏导,可得流域径流(Q)对气候变化要素(P, E_0)的敏感性系数:

$$\frac{\partial Q}{\partial P} = \left[1 + \left(\frac{E_0}{P} \right)^\omega \right]^{(1/\omega - 1)} \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial E_0} = \left[1 + \left(\frac{P}{E_0} \right)^\omega \right]^{(1/\omega - 1)} - 1 \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \omega} = [P^\omega + E_0^\omega]^{1/\omega} \cdot \left[\left(-\frac{1}{\omega^2}\right) \cdot \ln(P^\omega + E_0^\omega) + \frac{1}{\omega} \cdot \frac{1}{P^\omega + E_0^\omega} \cdot (\ln P \cdot P^\omega + \ln E_0 \cdot E_0^\omega) \right] \quad (7)$$

其中, ω 应用最小二乘法求解而得。

2.3 数据来源

本研究选取位于若尔盖流域及其周边区域的10个气象站点(见图1、表1)1960-2011年逐日气象数据(国家气象信息中心 <http://www.nmic.gov.cn/> 提供),主要包括蒸发皿蒸发量($\Phi 20$)、平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、日照时数、降水量和平均风速等。选择吉迈和玛曲水文站1960-2011年的月径流数据用于径流分析,气象站和水文站的基本信息见表1。

表1 研究区域气象站点及水文站点

Tab. 1 The hydrological stations and meteorological stations in the study area

代码	站名	经度(°E)	纬度(°N)	高程/m	类型
56067	久治	101.483	33.433	3630	气象站
56173	红原	102.550	32.800	3492.7	气象站
56079	若尔盖	102.967	33.583	3441.1	气象站
56074	玛曲	102.083	34.000	3473.2	气象站、水文站
56043	果洛	100.250	34.467	3720	气象站
56046	达日/吉迈	99.650	33.750	3968.5	气象站、水文站
56151	班玛	100.750	32.933	3530	气象站
56172	马尔康	102.233	31.900	2665.9	气象站
56182	松潘	103.567	32.650	2852.1	气象站
56065	河南	101.600	34.733	3501	气象站

3 结果分析

3.1 若尔盖流域径流演变特征

Manr Kendall 检验是水文学中普遍应用的非参数检验方法,其能够定量地计算出时间序列的变化趋势,适用于水文、气象等一系列非正态分布的数据,本研究对若尔盖流域1960-2011年间逐年径流量进行 Manr Kendall 趋势检验,统计检验值 Z 为 -2.83 ,其绝对值 $|Z| > 2.58$,表明研究区逐年径流量表现为明显的下降趋势,且在 0.01 水平上显著。另一方面,对若尔盖流域逐年径流量进行 Manr Kendall 突变检验,结果(图2)表明,研究区的年径流量 Manr Kendall 检验统计量 UF 值和 UB 值均超过了置信水平 0.05 相应的临界值($Y = 1.96$ 和 $Y = -1.96$), UF 曲线和 UB 曲线在1991年出现交叉点,且交点位于两临界线之间,这说明研究区径流变化过程中在1991年发生突变。

基于 Manr Kendall 突变检验结果,若尔盖流域逐年径流的可能的突变点在1991年,由此将研究时段划分为基准期(1960-1990年)和变化期(1991-2011年)。对比两个研究时段内的流域多年平均径流量,结果(图3)表明,若尔盖流域基准期多年平均径流量为 274.57 mm,变化期多年平均径流量为 218.34 mm,结果表明,与基准期相比,变化期径流量减少了 56.23 mm (20.48%)。

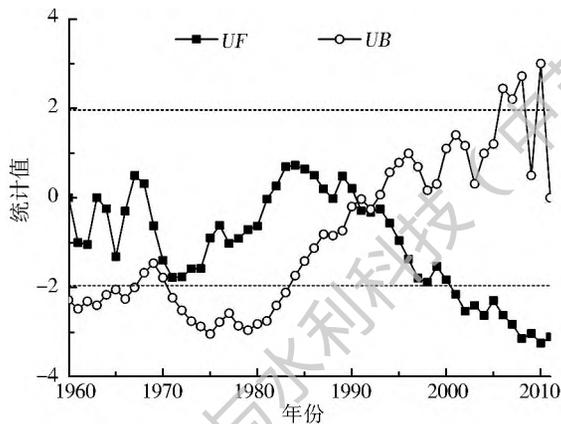


图 2 若尔盖流域年径流量 Mann-Kendall 突变检验

Fig. 2 The Mann-Kendall change test of streamflow in Zoige basin

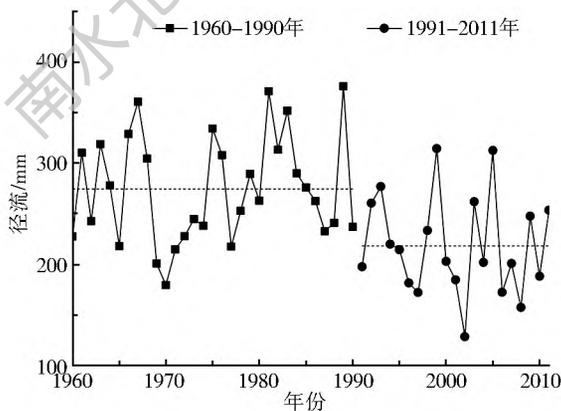


图 3 若尔盖流域基准期(1960-1990年)与变化期(1991-2011年)平均径流量对比

Fig. 3 The comparison of the streamflow between reference period (1960-1990) and change period (1991-2011) in Zoige basin

3.2 基于 Budyko 假设的流域径流对气候因子及流域下垫面特征参数的敏感性

基于若尔盖流域 1960-2011 年逐年数据,得到研究区多年平均径流量($Q=251.86\text{ mm}$)、多年平均降水量($P=687.45\text{ mm}$)和多年平均潜在蒸散发量($E_0=816.36\text{ mm}$),代入式(4)同时应用最小二乘法,求得研究区流域特征参数值 ω 为 1.9947。

基于式(5)、式(6)、式(7),求得若尔盖流域径流对降水的敏感性系数 $\partial Q/\partial P=0.6451$,流域径流对潜在蒸散发的敏感性系数 $\partial Q/\partial E_0=-0.2347$,流域径流对流域特征参数的敏感性 $\partial Q/\partial \omega=-182.2050$ 。这分别表示了,若尔盖流域降水每增加 1 mm 将导致流域径流增加 0.6451 mm,潜在蒸散发每增加 1 mm 将导致流域径流减少 0.2347 mm,流域特征参数每增加 1 将导致流域径流减少 182.2050 mm。

3.3 若尔盖流域径流变化归因分析

基于若尔盖流域基准期(1960-1990年)逐年数据,得到该研究时段多年平均径流量(274.57

mm)、多年平均降水量(683.96 mm)和多年平均潜在蒸散发量(813.73 mm),代入公式(4)同时应用最小二乘法,求得研究区基准期的流域特征参数值 ω 为 1.8746;同理,基于变化期(1991-2011年)的多年平均径流量(218.34 mm)、多年平均降水量(692.60 mm)和多年平均潜在蒸散发量(822.14 mm),求得研究区变化期的流域特征参数值为 2.2064。两个研究时段径流、气象及流域特征参数变化见表 2。

表 2 不同研究时段径流、气象及流域特征参数变化

Tab. 2 The changes of stream flow, meteorological, and catchment characteristic parameters

研究时段	Q/mm	P/mm	E_0/mm	ω
1960-1990年	274.57	683.96	813.73	1.8746
1991-2011年	218.34	692.60	822.14	2.2064
变化	-56.23	8.64	8.41	0.3318

基于若尔盖流域径流对气候因子(P 、 E_0)的敏感性系数及气候变化量(ΔP 、 ΔE_0),计算可得气候变化对流域径流的影响量为:

$$\Delta Q_{\text{climate}} = \partial Q/\partial P \cdot \Delta P + \partial Q/\partial E_0 \cdot \Delta E_0 =$$

$$5.57 + (-3.85) = 3.60(\text{mm})$$

基于若尔盖流域径流对流域特征参数值(ω)的敏感性系数及流域特征参数值变化量($\Delta \omega$),计算可得流域特征变化对流域径流的影响量为:

$$\Delta Q_{\text{catchment}} = \partial Q/\partial \omega \cdot \Delta \omega = -60.46(\text{mm})$$

由此可得若尔盖流域径流变化归因结果见表 3,结果表明,在研究时段 1960-2011 年间若尔盖流域径流变化的主要原因是流域特征的变化,导致流域径流减少 60.46 mm,贡献率可达 93.46%,而气候变化的影响仅占 5.57%。

表 3 研究流域径流变化归因分析

Tab. 3 The attribution analysis of streamflow changes in the Zoige basin

项目	ΔQ	$\Delta Q_{\text{climate}}$	$\Delta Q_{\text{catchment}}$	误差
影响量/mm	-56.23	3.60	-60.46	0.63
贡献率(%)	100	5.57	93.46	0.97

4 讨论

4.1 基于双累积曲线的结果验证

双累积曲线方法是水文气象要素一致性或长期演变趋势分析中最简单、最直观、最广泛的方法。其基本假设为降水在有限的时段内其变化时自然变化的,流域下垫面变化对降水的影响是微弱的,而累积径流量受下垫面及降水量共同作用,因此,通过

双累积曲线可以分辨流域下垫面变化对流域径流的影响。

图 4 为若尔盖流域年降水量与径流量的双累积曲线图,结果表明,1960–1990 年间降水累积量与径流累积量间有明显的线性关系,其拟合直线的斜率在 1991 年发生明显的变化,这也符合本研究中对研究时段的划分,同时表明,下垫面变化在该时段开始对流域径流有明显的影响,其偏离点与原拟合直线的延长线的距离表示了下垫面变化的影响量。

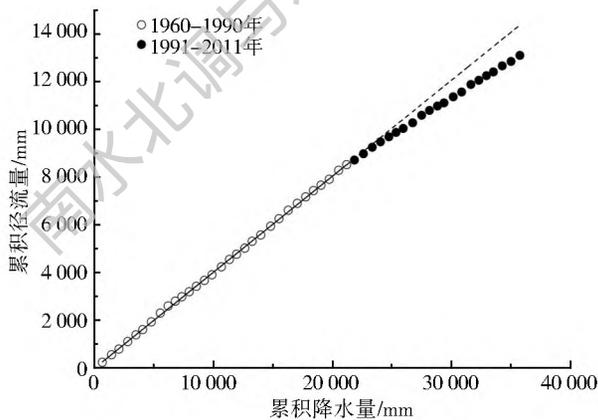


图 4 若尔盖流域年降水量与径流量的双累积曲线

Fig. 4 The double mass curve of annual precipitation and streamflow in Zoige basin

从图中可以看出,基准期累积径流量 $\Sigma Q = 0.4033 \Sigma P - 31.071$, 方程决定系数 R^2 为 0.9907, 观测年数 N 为 52 年,统计检验达到了 0.001 置信水平。将变化期的累计降水量带入拟合方程中,得到模拟累计径流量,并反推变化期模拟逐年径流量 Q ,图 5 反映了变化期逐年实测径流量与模拟径流量的对比,结果表明,变化期(1991–2011)实测年平均径流量为 218.34 mm,模拟年平均径流量为 279.12 mm,由此可知,下垫面导致的径流变化量 $\Delta Q_{\text{catchment}}$ 为 60.78 mm。

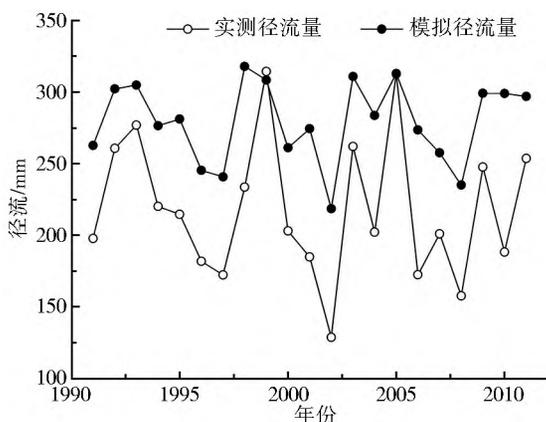


图 5 基于双累积曲线的变化期流域径流模拟值与实测值对比

Fig. 5 The comparison between simulated and measured streamflow based on double mass curve

4.2 敏感性分析方法

相比其他研究方法,越来越多的研究者开始采用气候敏感性分析方法来研究气候变化对流域径流的影响^[17]。敏感性分析方法为探索流域径流演变的驱动机制提供了更简便的途径^[18],也提供了一个新的视角。而大多数敏感性分析研究都是基于理论模型,其中应用最为广泛的理论模型是多年水热耦合平衡方程。Budyko 假设是水热平衡的典型代表,也是流域水文过程研究中应用最为广泛的理论基础之一^[19-20]。而我国学者也分别在湿润区^[21]与非湿润区^[22-23]进行了应用,对其在我国的适用性进行了分析。本研究基于 Budyko 假设理论的敏感性分析方法,同时应用常用的双累积曲线对研究结果进行验证,结果表明敏感性分析方法的结果是可信的。

5 结论

本研究以若尔盖流域为研究区域,基于 Budyko 理论,分别对研究区径流年际变化过程中气候变化和下垫面变化的影响进行分析,研究结论如下。

(1) 若尔盖流域逐年径流呈明显的下降趋势,基于突变点 1991 年,将研究时段划分为基准期(1960–1990 年)和变化期(1991–2011 年),与基准期相比,变化期径流量减少了 56.23 mm(20.48%)。

(2) 若尔盖流域径流对降水、潜在蒸散发和流域特征参数的敏感性系数分别为 0.6451、-0.2347 和 -182.2050,表明,若尔盖流域降水每增加 1 mm 将导致流域径流增加 0.6451 mm,潜在蒸散发每增加 1 mm 将导致流域径流减少 0.2347 mm,流域特征参数每增加 1 将导致流域径流减少 182.2050 mm。

(3) 在研究时段 1960–2011 年间,若尔盖流域径流变化的主要影响因素是流域下垫面特征的变化,其贡献率可达 93.46%,而气候变化的影响仅占 5.57%。

参考文献(References):

- [1] 夏军,石卫.变化环境下中国水安全问题研究与展望[J].水利学报,2016,47(3):292-301.(XIA J,SHI W.Perspective on water security issue of changing environment in China[J].Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(3):292-301.(in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20150937.
- [2] GLEICK PH. Climate change, hydrology, and water resources [J]. Reviews of Geophysics, 2010, 27(3): 329-344. DOI: 10.1029/RG027i003p00329.
- [3] GAO G, FU B, WANG S, et al. Determining the hydrological responses to climate variability and land use/cover change in the Loess Plateau with the Budyko framework[J]. Science of

- the Total Environment, 2016, 557-558: 331. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2016. 03. 019.
- [4] JIANG C, XIONG L, WANG D, et al. Separating the impacts of climate change and human activities on runoff using the Budyko type equations with time varying parameters[J]. Journal of Hydrology, 2015, 522: 326-338. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2014. 12. 060.
- [5] MARKOVICH KH, MAXWELL RM, FOGG GE. Hydrogeological response to climate change in alpine hillslopes [J]. Hydrological Processes, 2015, 30 (18): 3126-3138. DOI: 10. 1002/hyp. 10851.
- [6] LOPEZ A, FAI F, NEW M, et al. From climate model ensembles to climate change impacts and adaptation: a case study of water resource management in the southwest of England[J]. Water Resources Research, 2009, 45(8): 2263-2289. DOI: 10. 1029/2008WR007499.
- [7] HARRIGAN S, MURPHY C, HALL J, et al. Attribution of detected changes in streamflow using multiple working hypotheses[J]. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 2014, 18(5): 1935-1952. DOI: 10. 5194/hess-18-1935-2014.
- [8] WANG H, YU X. Sensitivity analysis of climate on streamflow in north China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 119(1): 391-399. DOI: 10. 1007/s00704-014-1289-6.
- [9] LEGESSE D, VALLET-COULOMB C, GASSE F. Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa: case study South Central Ethiopia[J]. Journal of Hydrology, 2003, 275(1-2): 67-85. DOI: 10. 1016/S0022-1694(3)00019-2.
- [10] KOPNAPALAG, MISHRA AK. Three parameter based streamflow elasticity model: application to MOPEX basins in the USA at annual and seasonal scales[J]. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 2016, 20(6): 1-28. DOI: 10. 5194/hess-20-2545-2016.
- [11] BUDYKO MI. Climate and life[M]. Academic Press, 1974.
- [12] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. 大气科学, 1981, 5(1): 25-33. (FU B P. On the calculation of the evaporation from land surface[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences. 1981, 5(1): 23-31. (in Chinese)) DOI: 10. 3878/j. issn. 1006-9895. 1981. 01. 03.
- [13] LI D, PAN M, CONG Z, et al. Vegetation control on water and energy balance within the Budyko framework. Water Resources Research, 2013, 49(2): 6550. DOI: 10. 1002/wrcr. 20107.
- [14] XU X, LIU W, SCANLON BR, et al. Local and global factors controlling water-energy balances within the Budyko framework[J]. Geophysical Research Letters. 2013, 40(23): 6123-6129. DOI: 10. 1002/2013GL058324.
- [15] YANG H, YANG D, LEI Z, et al. New analytical derivation of the mean annual water energy balance equation [J]. Water Resources Research. 2008, 44(3): 893-897. DOI: 10. 1029/2007WR006135.
- [16] SCHAAKE JC. From climate to flow, in Climate Change and U. S. Water Resources, edited by P. E. Waggoner, chap. 8, pp. 177-206, John Wiley, N. Y. 1990.
- [17] WILLIAMSON TN, NYSTOM EA, MILLY PCD. Sensitivity of the projected hydroclimatic environment of the Delaware River basin to formulation of potential evapotranspiration [J]. Climatic Change, 2016, 139(2): 1-14. DOI: 10. 1007/s10584-016-1782-2.
- [18] 王国庆, 张建新, 刘九夫, 等. 中国不同气候区河川径流对气候变化的敏感性[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 307-314. (WANG G, ZHANG J, LIU J, et al. The sensitivity of runoff to climate change in different climatic regions in China[J]. ADVANCES IN WATER SCIENCE, 2011, 22(3): 307-314. (in Chinese)) DOI: 10. 3773/j. issn. 1009-0142. 2011. 03. 003.
- [19] RENNER M, SEPPELT R, BERNHOFER C. Evaluation of water energy balance frameworks to predict the sensitivity of streamflow to climate change[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012a, 16(5): 1419-1433. DOI: 10. 5194/hess-16-1419-2012.
- [20] RENNER M, BERNHOFER C. Applying simple water energy balance frameworks to predict the climate sensitivity of streamflow over the continental United States[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012b, 16(8): 2531-2546. DOI: 10. 5194/hess-16-2531-2012.
- [21] XIONG L, GUO S. Appraisal of Budyko formula in calculating long term water balance in humid watersheds of southern China[J]. Hydrological Processes. 2012, 26(9): 1370-1378. DOI: 10. 1002/hyp. 8273.
- [22] ZHANG L, NAN Z, XU Y, et al. Hydrological Impacts of Land Use Change and Climate Variability in the Headwater Region of the Heihe River Basin, Northwest China[J]. Plos One, 2016, 11(6): e0158394. DOI: 10. 1371/journal.pone. 0158394.
- [23] 孙福宝, 杨大文, 刘志雨, 等. 基于 Budyko 假设的黄河流域水热耦合平衡规律研究[J]. 水利学报, 2007, 38(4): 27-35. (SUN F, YANG D, LIU Z, et. Study on coupled water energy balance in Yellow River basin based on Budyko Hypothesis [J]. JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING, 2007, 38(4): 27-35. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0559-9350. 2007. 04. 005.
- [24] 胡云华, 冯精金, 王铭烽, 等. 气候及下垫面变化对嘉陵江流域径流与输沙的影响[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(4): 75-83. (HU Y, FENG J, WANG J, et al. Influences of climate and land surface change on runoff and sediment in Jialing River Basin [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14(4): 75-83. (in Chinese)) DOI: 10. 16843/j. sswc. 2016. 04. 010.