

气候变化和人类活动对伊逊河流域径流变化的影响

吴立钰¹, 张璇^{1,2}, 李冲¹, 郝芳华^{1,2}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 北京师范大学中国绿色发展协同创新中心, 北京 100875)

摘要: 借助 Mann-Kendall 趋势检验和突变检验对气象水文序列进行一致性分析, 划分基准期 (1961—1979 年) 和影响期 (① 1980—1989 年、② 1990—1999 年、③ 2000—2016 年), 利用基准期校准的可变下渗容量 (VIC) 模型, 采用步进式方法, 探究气候变化和人类活动对伊逊河流域径流变化的波动影响过程。结果表明: 研究区近 56 年年均气温显著升高, 年降水量无明显变化趋势, 流域年径流量下降趋势明显, 季节尺度上流域非汛期降水量增加显著。气候变化和人类活动均会对径流产生显著影响且作用机理复杂, 步进式方法对影响机理的研究较传统方法更能体现其变化过程; 在降水丰沛的影响 ② 期, 冬季降水量增加会显著增加流域径流量, 而在降水略少的影响 ① 期和 ③ 期, 蒸发量增加以及土壤含水量降低使得流域径流减少; 人类活动耗水在影响 ① 期和 ③ 期引起流域径流减少并且影响作用逐渐增强, 影响 ② 期由于城镇化和耕地扩张使得流域产流能力增强导致径流增加。深入研究气候变化和人类活动对径流的影响机制, 可为流域水资源管理和规划提供理论依据。

关键词: 气候变化; 人类活动; 径流变化; 可变下渗容量 (VIC) 模型; 伊逊河流域

随着经济发展, 人类活动对流域产汇流及水文循环过程的干扰加剧, 同时全球变暖等气候变化问题对水资源产生了重大影响, 定量区分二者的影响是近年来水科学研究的热点问题之一^[1-3]。自 1980 年起, 世界气象组织 (WMO)、联合国环境规划署 (UNEP)、国际水文科学协会 (IAHS) 等国际组织先后实施了如政府间气候变化专门委员会 (IPCC)、世界气候研究计划 (WCRP)、国际水文计划 (IHP) 等一系列合作项目和研究计划, 旨在研究变化环境下的水文循环过程。

在气候变化中, 气象要素如温度、降雨的时空分布及强度变化直接影响河川径流的变化, 另外全球变暖影响植被和土壤蒸散发^[4], 导致土壤含水量的变化和径流的分配; 而人类活动强度不断加大使得人类对自然水文过程的影响日益显著, 人口增加、耕地扩张以及城镇化、工业化的加快导致了工业、农业以及生活用水量增加。《2017 年全国水资源公报》指出 2017 年全国用水总量为 6043.4 亿 m³, 相较于 1998 年用水总量 3063 亿 m³ 增加近 1 倍, 其中生活用水量由 1998 年的 799.2 亿 m³ 增加至 838.1 亿 m³。工业用水由 756.3 亿 m³ 增加至 1277 亿 m³, 农业用水量增加最为明显, 由 1998 年的 2005.6 亿 m³ 增加至 3766.4 亿 m³。同时修建水利工程、改变土地利用类型等行为使得流域下垫面发生变化, 干扰了流域自然的水文过程, 从而对水资源形成过程产生影响^[5]。

收稿日期: 2019-05-24; 修订日期: 2019-08-17

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2017XTCX02)

作者简介: 吴立钰 (1997-), 男, 福建三明人, 硕士, 主要从事水文模型和水资源管理方面研究。

E-mail: WuLiyu@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 张璇 (1984-), 女, 河南安阳人, 博士, 讲师, 主要从事流域水环境管理、绿色发展与环境规划、面源污染与管理控制等多个领域研究工作。E-mail: xuan@bnu.edu.cn

近年来, 各国学者在河川径流变化归因分析和气候变化影响方面进行了大量研究^[6,7], 采用水文模型模拟自然产流情况用于计算气候变化和人类活动对径流变化的贡献率。可变下渗容量模型 (Variable Infiltration Capacity Model, VIC) 作为常用的半分布式水文模型, 已被广泛用于流域径流模拟、土壤含水量模拟以及气候变化对水资源影响的研究中^[8-12], 许多学者在中国各大流域运用VIC模型也得到了较好的效果^[13-15]。

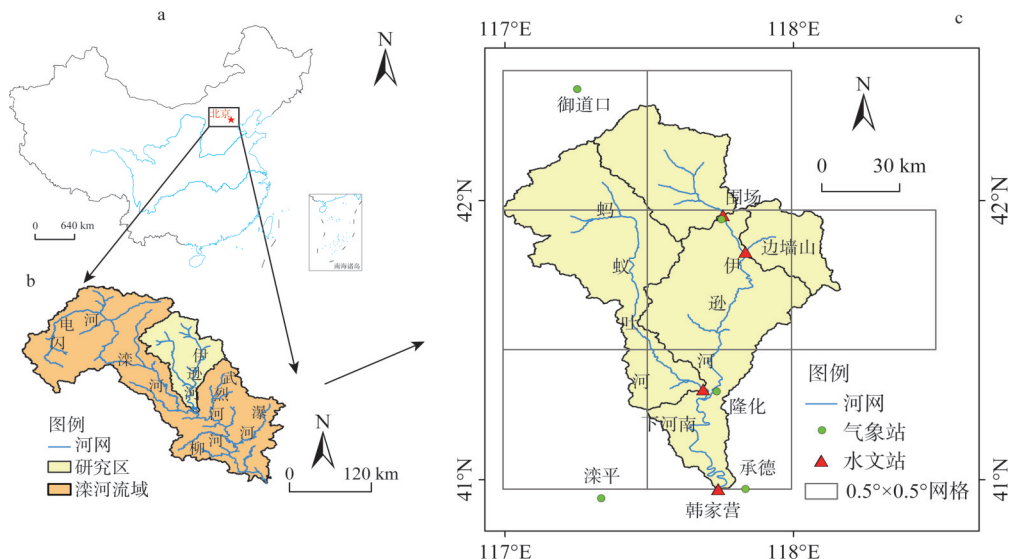
现有研究大多是将气候变化和人类活动归因于一个突变点, 仅划分一个影响期^[16,17], 但实际上气候变化和人类活动对径流的影响大多是渐进的^[18]。本文以统计检验所得的突变点 (1980年、1990年、2000年) 为节点, 采用步进式划分为1个基准期 (1960—1979年) 和3个影响期 (1980—1989年、1990—1999年、2000—2016年), 以伊逊河流域为研究区, 使用半分布式VIC模型, 采用分离环境变量法计算各影响期气候变化和人类活动对径流变化的影响程度, 同时分析气候变化对研究区径流变化的影响机制。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

伊逊河是滦河最大的支流, 发源于围场县, 流经隆化和滦平两县, 在隆化县下河南与蚂蚁吐河相汇后经滦平县于韩家营汇入滦河, 全长195 km, 流域面积6750 km², 全流域均在河北省境内, 其地理位置、各水文站点和气象站点的位置见图1。

伊逊河流域地势西北高、东南低, 海拔在337~1833 m之间^[19]。流域气候属于典型温带大陆性季风气候, 年均气温4.7~7.0 °C, 年降雨量440~570 mm, 降水量年内分配不均, 全年降水量的70%~80%集中在6-9月 (汛期), 导致伊逊河径流年际变化和丰枯变化都较大, 常出现连续丰水期或连续枯水期; 径流年内分布与降水量年内分配基本一致,



注: 本图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载审图号GS(2016)1569号标准地图制作, 底图无修改, 下同。

图1 研究区地理位置及水文、气象站点分布

Fig. 1 Geographical location and stations distribution of the Yixun River Basin

多集中于夏季, 枯水季节水量较小且比较稳定。流域径流主要来源于天然降水补给, 平均年径流量为2.53亿 m^3 , 平均年径流深为37.5 mm, 径流系数小于0.1。

流域土壤类型主要以壤土为主, 植被类型中草原和林地占大部分; 流域内人类活动干扰显著, 其干流上的庙宫水库控制了约1/3的流域面积, 水库每年向灌区供水3000万 m^3 , 灌溉面积6000 hm^2 。

从1980年和2010年研究区两期植被覆盖类型图(图2c、图2d)可以看出, 人类活动对植被类型的干扰主要体现在: 流域林地面积减少, 草原、耕地以及城镇面积增多, 其中耕地自下游至流域出口增加尤为明显, 有沿河流向上游扩展的趋势; 同时气温升高和降水的变化对流域的径流影响显著, 因此区分气候变化和人类活动对流域径流变化的影响, 对研究区水资源保护和规划有重要意义。

1.2 数据来源

数字高程数据采用中国90 m分辨率的数字高程模型数据集(DEM), 来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>) (图2a); 流域土壤类型及参数采用国际粮农组织(FAO)发布的全球土壤类型数据, 来自中国寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>) (图2b); 植被覆盖类型数据来源于卫星数据反演的1 km全球植被覆盖类型, 来自中国寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>) (图2c、图2d)。

气象数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>), 包括日尺度降水、气温、湿度、大气压、风向、风速等; 流域水文数据主要来自流域水文年鉴。

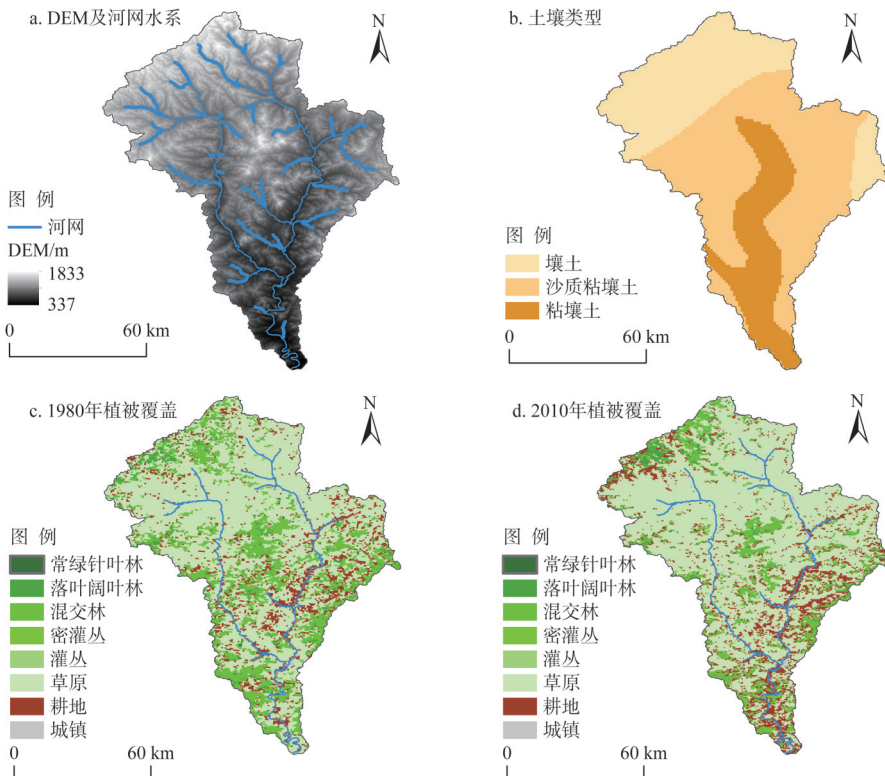


图2 研究区基础数据

Fig. 2 Basic data of the Yixun River Basin

1.3 研究方法

1.3.1 VIC模型

可变下渗容量 (VIC) 模型是华盛顿大学、普林斯顿大学及加州大学伯克利分校共同开发维护的一种基于SVATS (Soil Vegetation Atmospheric Transfer Schemes) 思想的空间网格化大尺度半分布式水文模型, 易于气候模式嵌套; 其侧重于描述陆—气之间主要的水文气象过程, 包括: 土壤层蒸发、植被散发、地表截留蒸发、侧向热通量、感热通量、长波辐射、短波辐射、地表热通量、下渗、渗漏、地表径流和基流等, 具有很强的物理基础, 能够考虑天气、土壤性质、地形、植被的综合作用, 同时能够灵活处理各种复杂应用条件; 模型内置蓄满产流和超渗产流两种产流机制^[20], 可同时进行陆—气之间的水量平衡和能量平衡过程模拟, 能较准确地模拟流域下垫面不均匀性, 对于半干旱和半湿润地区的水文模拟具有良好的适用性^[8,15,21,22]。

1.3.2 Mann-Kendall秩次相关检验

Mann-Kendall(以下简称M-K)秩次检验法作为一种非参数统计检验方法, 常用于确定降水、气温和径流等要素时间序列的长期变化趋势和突变情况^[23]。其优点在于, 被检测序列不需要遵从正态分布, 也可以排除少数异常值的干扰^[24]。当M-K检验方法^[25,26]用于序列 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 变化趋势检验时, 定义统计变量 S :

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (1)$$

式中: $\text{sign}(x_i - x_j)$ 为阶跃函数, 表示为:

$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1 & x_i - x_j > 0 \\ 0 & x_i - x_j = 0 \\ -1 & x_i - x_j < 0 \end{cases} \quad (2)$$

定义检验统计量 Z 为:

$$Z = \begin{cases} \frac{(S-1)}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{(S+1)}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: Z 服从正态分布, 在双边检验中, $Z > 0$ 表示序列呈上升趋势, $Z < 0$ 表示序列呈下降趋势; Z 的绝对值 ≥ 1.96 时, 表示通过了95%的显著性检验。

对时间序列 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 进行M-K突变检验时, 构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^i \alpha_{ij} \quad (k=2, 3, 4, \dots, n) \quad (4)$$

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (1 \leq j \leq i) \quad (5)$$

定义统计变量 UF_k :

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{k(k-1)(2k+5)/72}} \quad (k=2, 3, 4, \dots, n) \quad (6)$$

$$E(S_k) = \frac{k(k+1)}{4} \quad (7)$$

UF_k 为标准正态分布, 给定显著性水平 α , 若 $|UF_k| > U_{\frac{\alpha}{2}}$, 则表明序列在显著性水平 α 上存在明显趋势变化, 将时间序列 X 进行逆序排列, 再按上述式(4)~式(6)进行计算, 同时令:

$$\begin{cases} UB_k = -UF_k \\ k = n+1-k \end{cases} \quad (k=2, 3, 4, \dots, n) \quad (8)$$

通过分析统计序列 UF_k 和 UB_k 可以进一步分析序列 X 的趋势变化, 若 UF_k 大于0, 则表明序列呈上升趋势, 反之则为下降趋势; 当 UF_k 超过临界直线时, 表明上升或下降趋势显著。如果 UF_k 和 UB_k 两条曲线出现交点, 且交点在临界直线之间, 那么交点对应的时刻即为显著的突变点。

1.3.3 分离环境变量法

根据研究区内人类活动对自然环境的影响程度, 一般将水文序列(特别是径流序列)依据变化节点划分为“天然阶段”和“人类活动影响阶段”, 即“基准期”和“影响期”。研究表明, 造成影响期与基准期实测径流差值的主要因素包括人类活动和气候变化^[27]; 基准期实测径流序列认为不受人类活动和气候变化影响, 影响期实测径流序列则是两者共同作用的结果, 而采用基准期径流数据率定的VIC模型模拟影响期水文序列所得径流可认为不受人类活动影响; 参照文献^[16,28]中的环境变量分离方法, 本文中气候变化部分计算采用影响期模拟径流量和基准期实测径流量计算差值所得, 人类活动影响部分为影响期模拟径流与同时期实测径流的差值。具体计算公式如下:

$$\Delta R = R_1 - R_0 = \Delta R_{climate} + \Delta R_{human} \quad (9)$$

$$\Delta R_{climate} = R - R_0 \quad (10)$$

$$\Delta R_{human} = R_1 - R \quad (11)$$

$$\eta_{climate} = \frac{\Delta R_{climate}}{\Delta R} \times 100\% \quad (12)$$

$$\eta_{human} = \frac{\Delta R_{human}}{\Delta R} \times 100\% \quad (13)$$

式中: ΔR 为径流变化总量 (mm); R_1 为影响期实测径流量 (mm); R_0 为基准期实测径流量 (mm); R 为影响期模拟径流量 (mm); $\Delta R_{climate}$ 为气候变化对径流的影响值 (mm); ΔR_{human} 为人类活动对径流的影响值 (mm); $\eta_{climate}$ 和 η_{human} 分别为气候变化和人类活动对径流变化的贡献率 (mm)。

2 结果分析

2.1 水文序列一致性分析

由于气候变化和人类活动的双重影响, 流域内水文循环过程发生变化, 使得流域降雨径流过程呈现与历史水文过程非一致性的变化特征, 在这种变化背景下, 开展水文研究首先就需要检验流域降雨径流过程是否满足一致性假设。本文采用M-K秩次相关检验法研究伊逊河流域水文气象序列的变化趋势, 研究区内围场、承德两个气象站的年降水量变化趋势不显著(图3a), 全流域气温呈显著上升趋势(图3b), 与全球气候变暖趋势相符合^[1]; 气温对水资源的影响是复杂的, 在不同时间和地区, 不同气候条件和下垫面情

况下可能表现出增加或减少流域径流的双重作用;一方面气温升高使得蒸散发增加,会消耗地表水资源,导致流域径流量减少;另一方面气温升高对冰雪融化有促进趋势,对于冬季结冰期较长或者主要由高山冰雪融水提供水源的河流的径流量有增加作用^[27];而降水变化会直接导致径流增加或减少。

对于本研究区,通过对季节降水数据趋势分析可得(图3a),流域非汛期(春、秋、冬)降水有增加趋势,流域冬季连续干旱日数显著减少,最大日降水量上升,冬季降水频率增大使得当季降水量显著增加;流域北部地区(围场站)夏季降雨表现出不明显下降趋势,而南部地区(承德站)夏季降雨有上升的趋势;由图3c可得研究区内径流整体呈下降趋势,韩家营站与下河南站下降趋势显著。流域水文分析是水利工程规划建设和水资源优化配置的重要支撑,同时掌握过去的水资源状况及变化趋势对预测未来水文演变趋势具有重要意义。

应用M-K突变检验对研究区水文气象序列突变情况进行检验。由图3可知研究区降水变化较复杂,较明显的变化节点在1990年左右(图4a、图4b),流域气温变化节点在1980年和1987年(图4c、图4d),流域径流的变化节点在2000年(图4e、图4f);因此对于研究区伊逊河流域,参照已有研究^[16,28],将1980年前划分为基准期(1960—1979年),1980年后划分为三个影响期(① 1980—1989年、② 1990—1999年、③ 2000—2016年)(图5)。

基准期多年平均降雨量为462.7 mm;影响①期多年平均降雨量为406.7 mm,相较于研究区基准期多年平均降雨量减少了12%;影响②期多年平均降雨量为514.9 mm,高于平均值约11%;影响③期多年平均降雨量为455.4 mm,低于平均值约2%。参照《水文情报预报规范》(GB/T 22482-2008)中对丰、平、枯水年的划分,定义距平百分率 P :

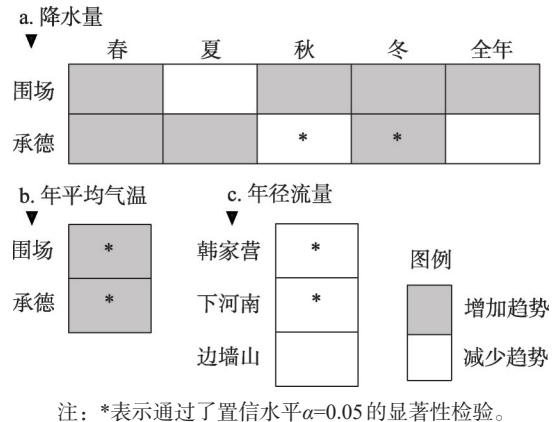
$$P = \frac{\Delta R}{\bar{R}} \times 100\% \quad (14)$$

式中: ΔR 为某年年均径流量与多年平均径流量的差值(mm); \bar{R} 为多年平均径流量(mm)。

当 $P > 10\%$ 时定义为偏丰水年, $P < -10\%$ 时定义为偏枯水年,当 $-10\% < P < 10\%$ 时定义为平水年。本文中影响期实测径流受人类活动影响较大,若采用实测径流进行划分则不能很好地反映流域水资源丰、平、枯的变化,因此采用受人类活动影响较小的多年平均降雨量及相应数据代入式(14)计算。类似地,将影响①期定义为偏枯水时期,影响②期属于丰水时期,影响③期定义为平水时期。

2.2 模型模拟结果

根据气象站点和水文站点分布情况,将研究区划分为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的方形网格(图1c);各网格气象数据由流域内5个气象站点根据IDW方法反距离加权插值得到;基准期模型植被参数选取1980年植被覆盖类型数据,采用1960—1976年韩家营站实测流量数据对模型进行参数率定,1977—1980年进行参数检验,同时利用流域内下河南、边墙山站点1960—1980年月径流数据对模型进行空间交叉验证,采用Nash效率系数 NSE 和Spearman



注: *表示通过了置信水平 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。

图3 研究区降水、气温及径流变化趋势M-K检验结果

Fig. 3 Results of M-K trend test values for precipitation, temperature and runoff in the Yixun River Basin

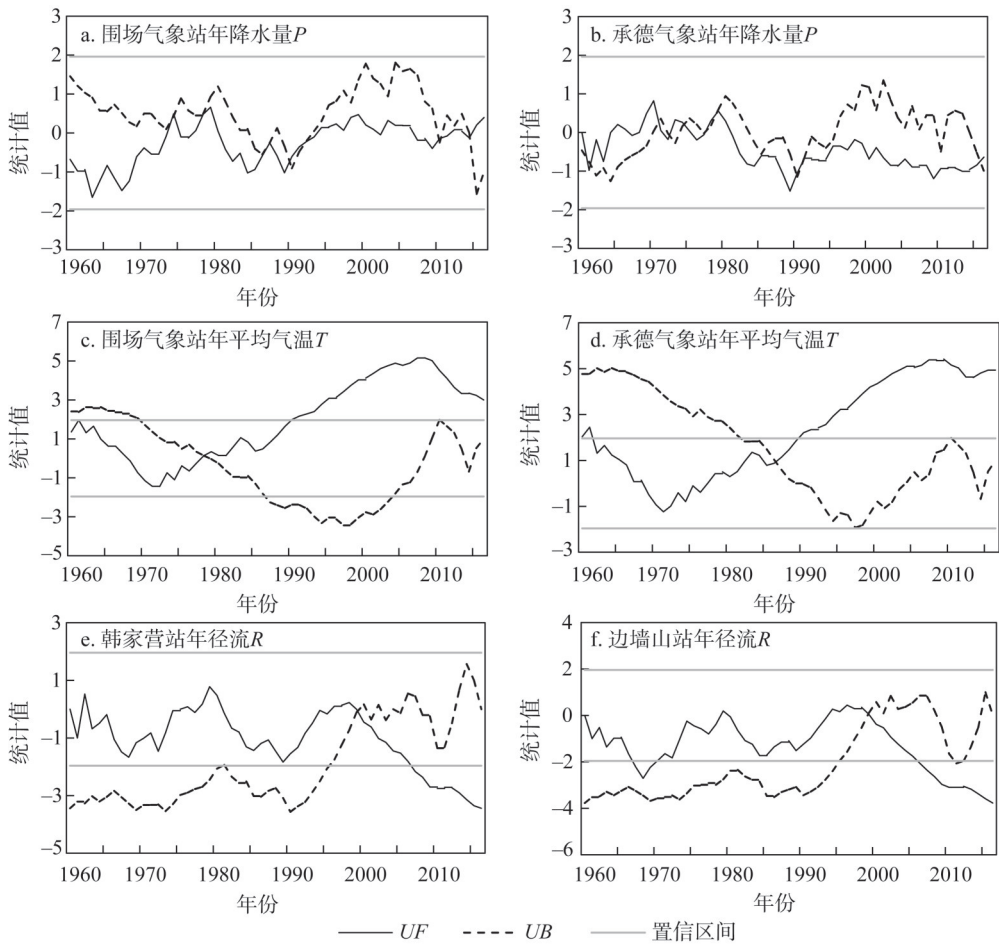


图4 研究区水文气象序列M-K突变检验结果

Fig. 4 Results of M-K mutation test for meteorological and hydrological data of the Yixun River Basin

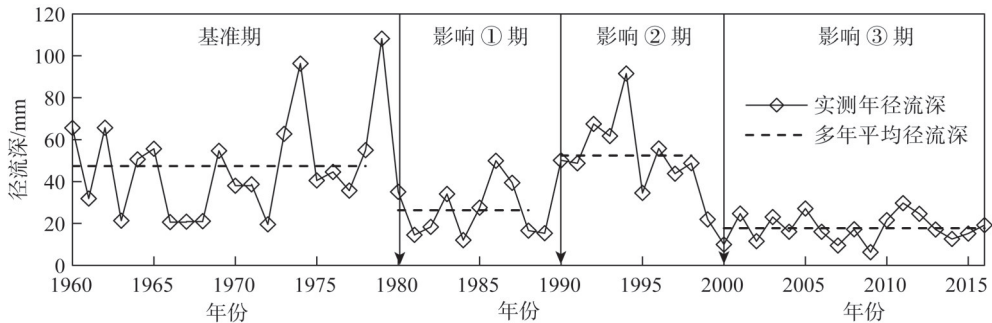


图5 研究区流域出口韩家营站年径流深R

Fig. 5 Annual runoff depth of the study area outlet station (Hanjiaying station)

秩相关系数的平方 R^2 对模型模拟效果进行评价。一般来说, NSE 和 R^2 越接近1, 表示模拟精度越高, 模拟径流和实测径流的拟合度越好。各站点VIC模型模拟效果如图6所示。

由图6可知, VIC模型对研究区站点径流模拟效果较好, 模拟流量过程线和实测流量过程线基本拟合; 对于韩家营站点, 除1966—1969年峰值略有高估外其余峰值拟合较

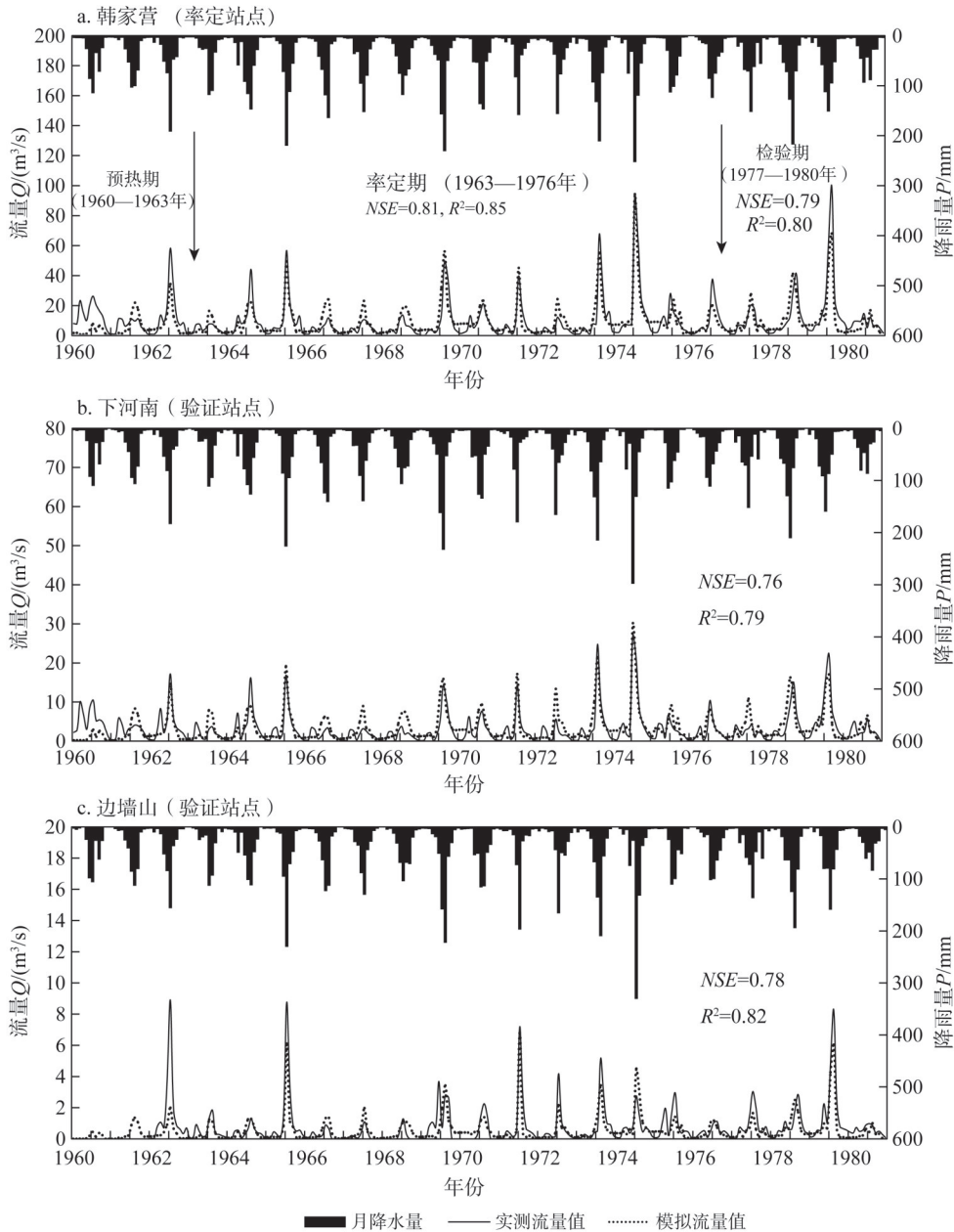


图6 研究区各站点月降雨—径流过程线

Fig. 6 Comparison of observed runoff and simulated runoff in the Yixun River Basin

好，非汛期流量较实测数据平缓，率定期 NSE 为 0.81，验证期 NSE 为 0.79，总体精度较为满意；其余两个站点 NSE 均超过 0.75， R^2 均大于 0.79，因此半分布式 VIC 模型能较好地反映该流域的水文过程，可用于研究区伊逊河流域长时间水文模拟。VIC 模型参数见表 1。

2.3 贡献率分析

应用 VIC 模型，采用对应时期的气象数据日均值以及 1980 年研究区植被覆盖类型数据对伊逊河流域 1960—2016 年进行径流模拟，得到影响期模拟径流序列只受气候变化影响，计算各影响期的多年平均径流深（表 2、图 7），由模型可得流域不同时期土壤水含

表1 研究区VIC模型参数

Table 1 Parameters of VIC model

| 参数 | 单位 | 描述 | 取值范围 | 率定结果 |
|---------------|----|-----------------------------|-----------|-------|
| b | — | 饱和容量曲线参数 | 0.001~1.0 | 0.088 |
| D_s | — | 非线性基流发生时占 $D_{s_{max}}$ 的比例 | 0.001~1.0 | 0.16 |
| $D_{s_{max}}$ | mm | 基流日最大出流 | 0.1~50.0 | 3.54 |
| W_s | — | 非线性基流发生时占最大含水量的比例 | 0.2~1.0 | 0.89 |
| C | — | 下渗曲线指数 | 2.0 | 2.00 |
| d_1 | m | 第一层土壤厚度 | 0.1 | 0.10 |
| d_2 | m | 第二层土壤厚度 | 0.1~3.0 | 1.25 |
| d_3 | m | 第三层土壤厚度 | 0.1~3.0 | 1.65 |

表2 研究区韩家营站影响期多年平均径流深及贡献率

Table 2 Multi-year average runoff depth and contribution rate of the impact periods at Hanjiaying station

| 影响期 | R_0 /mm | R_1 /mm | R /mm | ΔR /mm | $\Delta R_{climate}$ /mm | ΔR_{human} /mm | $\eta_{climate}/\%$ | $\eta_{human}/\%$ |
|-----|-----------|-----------|---------|----------------|--------------------------|------------------------|---------------------|-------------------|
| ① | 47.37 | 26.30 | 32.64 | -21.07 | -14.73 | -6.34 | (-) 69.9 | (-) 30.1 |
| ② | 47.37 | 52.44 | 48.92 | 5.07 | 1.55 | 3.52 | (+) 30.5 | (+) 69.5 |
| ③ | 47.37 | 17.74 | 39.62 | -29.63 | -7.75 | -21.88 | (-) 26.2 | (-) 73.8 |

注：(+)号表示导致径流量增加；(-)表示径流量减少。

量(表3)。

1980—1989年影响①期属枯水时期，降雨量较基准期减少约12%，径流量较基准期年均径流量减少21.07 mm，约占44%，减少明显；该时期温度上升和降水减少均较明显，气候变化对径流减少的贡献率大约为70%，人类活动造成的径流减少约30%；在枯水时期，降水的减少直接导致了流域产流量减少，气温升高使得植被蒸散发和土壤蒸发作用加剧，蒸散发量增加，从而使得流域径流量明显减少^[22]；同时影响①期的土壤含水量较基准期有所下降，尤其是第三土壤层的含水量下降明显，VIC模型中第三层土壤含水量是河川基流的主要补给来源，土壤含水量的下降一方面使得流域降雨入渗量增加，地表径流减少，另一方面基流量减少，两者的相互作用使得流域流量减少(表3)。

表3 研究区影响期多年平均土壤含水量

Table 3 Multi-year average soil water content of the impact periods in the Yixun River Basin (mm)

| | 第一土壤层 | 第二土壤层 | 第三土壤层 | 总计 |
|------|-------|--------|--------|--------|
| 基准期 | 27.63 | 364.51 | 136.20 | 528.34 |
| 影响①期 | 27.55 | 359.65 | 115.35 | 502.55 |
| 影响②期 | 27.96 | 366.42 | 133.43 | 527.81 |
| 影响③期 | 27.77 | 364.67 | 128.78 | 521.22 |

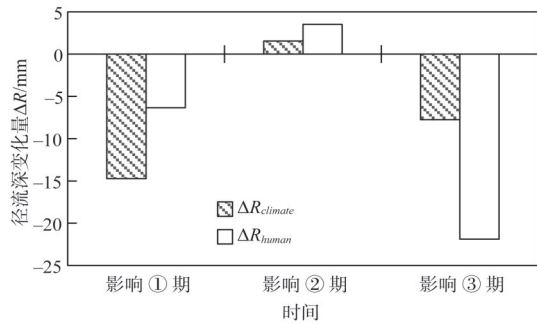


图7 研究区各影响期多年平均径流深变化量

Fig. 7 Annual average runoff depth variation of the impact periods in the Yixun River Basin

1990—1999年影响②期属于丰水时期, 径流量较基准期增加了5.07 mm, 约占11%, 降水量较基准期略有增加, 温度升高明显。与影响①期不同的是, 此时气候变化和人类活动分别使得流域径流量增加1.55 mm和3.52 mm, 表明在水量丰沛时期, 非汛期降水量增加会显著增加流域年径流量, 同时气候变化中冬季升温会加速当季冰雪融化从而增加径流量; 另一方面较高的土壤含水量使得河川基流量得到保证, 农业取用水减少, 人类活动对径流的减少作用被削弱。同时该时期城镇用地扩张导致不透水面积增加, 耕地增加使得流域下层土壤紧实度增加、滞水减少、透水性能变差, 下渗量减少, 产流能力增强, 导致气候变化中增加的降水量转化为地表径流的比例增大, 从而使得流域内径流增加^[29,30]。

2000—2016年影响③期属平水时期, 径流量较基准期减少29.63 mm, 约63%; 该时期温度上升较影响①期显著, 降水变化不明显, 气候变化使得径流减少了7.75 mm, 小于影响①期中气候变化的影响量, 而本时期人类活动造成径流减少约21.88 mm, 远大于影响①期中人类活动的影响量。在平水时期, 土壤含水量的降低使农业灌溉需水增加, 气温显著升高会使流域径流减少。同时, 随着工业化的加强, 耕地和城镇面积的扩大、以及居民生活水平的提高, 人类活动的需水量增多; 另外流域内中小水库的不断拦蓄也使得人类活动对径流变化的影响进一步加大。

3 结论与讨论

本文利用VIC模型对研究区伊逊河流域的径流过程进行模拟, 以1980年、1990年、2000年为节点, 通过步进式方式, 采用分离环境变量法探究气候变化和人类活动对径流变化的影响程度和影响机制, 结论如下:

(1) VIC模型在伊逊河流域具有良好的适用性, 流域出口站韩家营的模型NSE超过0.79, R^2 大于0.8, 但由于模型输入数据和模型自身参数的不确定性, 模型模拟径流的峰值与实测数据有一定误差, 后期可以通过优化数据来提高模型模拟精度。

(2) 气候变化对研究区径流的影响作用与流域土壤蓄水量相关, 在水量丰沛的年份, 流域土壤涵养水量较多时, 河川有稳定的基流来源, 气候变化带来的非汛期降水频率增加会显著增加径流量, 并且削弱人类取用水对径流的减少效应; 而在平水及枯水时期, 较低的土壤含水量会加大降雨的入渗, 减少地表产流以及对径流中基流的补充, 同时气温升高使得流域蒸发量加大, 导致流域径流减少。

(3) 人类活动在枯水及平水时期使得流域径流量减少, 并且随着人类活动强度的加剧, 耕地与城镇的增多, 工农业用水和生活用水量加大, 同时林地的减少使得研究区的水资源涵养能力和土壤蓄水能力减弱, 导致人类活动对径流减少的影响程度也越来越大; 而在丰水时期城镇用地和耕地的扩张导致流域滞水性能和透水性能变差, 下渗减少, 产流增多, 降水转化为地表径流的比例增大而使得流域内径流增加。

本文通过突变检验得出的时间节点划分三个影响期, 采用步进式的方法来定量计算气候变化和人类活动对径流变化的影响, 相较于传统的1个突变点, 划分方法更能反映出两者对流域径流的波动影响过程。引入土壤含水量分析得出, 气候变化对该流域径流变化的影响作用是双重的, 同时人类活动所进行的城镇化和耕地扩张对流域径流变化也

存在增加和减少作用,有助于更合理地管理和规划流域水资源。

此外,滦河流域已有研究表明,气候变化和人类活动在影响期使得流域径流减少^[16,17],这与本文结论不一致,原因之一是本文研究区伊逊河流域为滦河支流,与整个滦河流域的研究结论可能会有差异;二是由于研究的时间尺度不同,本文影响期划分较细,旨在探究气候变化和人类活动对径流变化的波动影响过程,而已有研究将人类活动影响作为一个影响期,时间跨度较大,没有进行影响过程的分析。

另一方面,本文也存在一定的局限性:根据流域地理位置和中国气象数据网的公开数据,伊逊河流域内仅有5个气象站数据可作为模型输入,气象站数据的不足可能会对模型模拟结果造成一定的偏差;但从模拟效果来看,韩家营站率定期和验证期 NSE 分别为0.81和0.79, R^2 均大于0.8,表明VIC模型能够较好地模拟伊逊河流域径流过程,在未来研究中可以通过增加流域雨量站数据进一步提高模型模拟精度。此外,本文在气候变化中主要考虑气温和降水变化带来的影响,其他因素比如植被蒸散发和极端气候事件等因素未考虑在内;而人类活动例如取用水、灌溉等因素也会对水文过程产生影响,因此在今后的研究中可进一步探究气候变化和人类活动中的其他因素对流域水文过程的影响。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate change and water. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2008.
- [2] 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.水科学进展,2012,23(2): 278-285. [DONG L H, XIONG L H, YU K X, et al. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology. *Advances in Water Science*, 2012, 23(2): 278-285.]
- [3] 黄斌斌,郝成元,李若男,等.气候变化及人类活动对地表径流改变的贡献率及其量化方法研究进展.自然资源学报,2018,33(5): 899-910. [HUANG B B, HAO C Y, LI R N, et al. Research progress on the quantitative methods of calculating contribution rates of climate change and human activities to surface runoff changes. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(5): 899-910.]
- [4] 王胜,许红梅,刘绿柳,等.全球增温1.5℃和2.0℃对淮河中上游径流影响预估.自然资源学报,2018,33(11): 1966-1978. [WANG S, XU H M, LIU L L, et al. Projection of the impacts of global warming of 1.5℃ and 2.0℃ on runoff in the upper-middle reaches of Huaihe River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(11): 1966-1978.]
- [5] LOPEZ S R, HOGUE T S, STEIN E D. A framework for evaluating regional hydrologic sensitivity to climate change using archetypal watershed modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(8): 3077-3094.
- [6] 熊立华,刘烁楠,熊斌,等.考虑植被和人类活动影响的水文模型参数时变特征分析.水科学进展,2018,29(5): 625-635. [XIONG L H, LIU S N, XIONG B, et al. Impacts of vegetation and human activities on temporal variation of the parameters in a monthly water balance model. *Advances in Water Science*, 2018, 29(5): 625-635.]
- [7] 史晓亮,杨志勇,严登华,等.滦河流域土地利用/覆被变化的水文响应.水科学进展,2014,25(1): 21-27. [SHI X L, YANG Z Y, YAN D H, et al. On hydrological response to land-use/cover change in Luanhe River Basin. *Advances in Water Science*, 2014, 25(1): 21-27.]
- [8] 谢正辉,刘谦,袁飞,等.基于全国50 km×50 km网格的大尺度陆面水文模型框架.水利学报,2004,35(5): 76-82. [XIE Z H, LIU Q, YUAN F, et al. Macro-scale land hydrological model based on 50 km×50 km grids system. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(5): 76-82.]
- [9] LEE M H, BAE D H. Climate change impact assessment on green and blue Water over Asian Monsoon Region. *Water Resources Management*, 2015, 29(7): 2407-2427.
- [10] LEI Q, YANG H, MCPHERSON R, et al. Climate change and hydrological response in the Trans-State Oologah Lake watershed-evaluating dynamically downscaled NARCCAP and statistically downscaled CMIP3 simulations with VIC model. *Water Resources Management*, 2014, 28(10): 3291-3305.
- [11] GOULD G K, LIU M L, BARBER M E, et al. The effects of climate change and extreme wildfire events on runoff ero-

- sion over a mountain watershed. *Journal of Hydrology*, 2016, 536: 74-91.
- [12] 王慧, 孙亚勇, 黄诗峰, 等. LAI和FVC植被参数对VIC模型土壤含水量模拟的影响研究. *中国水利水电科学研究院学报*, 2018, 16(2): 141-148. [WANG H, SUN Y Y, HUANG S F, et al. Study on the effects of vegetation parameters LAI and FVC on soil water content simulation using VIC model. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2018, 16(2): 141-148.]
- [13] 袁飞, 谢正辉, 任立良, 等. 气候变化对海河流域水文特性的影响. *水利学报*, 2005, 36(3): 274-279. [YUAN F, XIE Z H, REN L L, et al. Hydrological variation in Haihe River Basin due to climate change. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(3): 274-279.]
- [14] 金君良, 王国庆, 刘翠善, 等. 大尺度分布式水文模型VIC在嘉陵江流域径流模拟中的应用. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(1): 55-58. [JIN J L, WANG G Q, LIU C S, et al. Application of large scale distributed hydrological model to runoff simulation in Jialingjiang River Basin. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2012, 23(1): 55-58.]
- [15] 金君良, 陆桂华, 吴志勇. VIC模型在西北干旱半干旱地区的应用研究. *水电能源科学*, 2010, 28(1): 12-14. [JIN J L, LU G H, WU Z Y. Application research of VIC model to arid and semi-arid region of Northwest China. *Water Resources and Power*, 2010, 28(1): 12-14.]
- [16] 陈宏, 尉英华, 王颖, 等. 基于VIC水文模型的滦河流域径流变化特征及其影响因素. *干旱气象*, 2017, 35(5): 776-783. [CHEN H, YU Y H, WANG Y, et al. Variation characteristics and influencing factors of runoff in Luanhe River Basin based on VIC hydrological model. *Journal of Arid Meteorology*, 2017, 35(5): 776-783.]
- [17] 师忱, 袁士保, 史常青, 等. 滦河流域气候变化与人类活动对径流的影响. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 264-269. [SHI C, YUAN S B, SHI C Q, et al. Effects of climate change and human activities on runoff in Luanhe Basin. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(2): 264-269.]
- [18] ZIPPER S C, MOTEW M, BOOTH E G, et al. Continuous separation of land use and climate effects on the past and future water balance. *Journal of Hydrology*, 2018, 565: 106-122.
- [19] 杨志勇, 于赢东, 王建华, 等. 气候变化对伊逊河流域水资源量的影响. *水科学进展*, 2011, 22(2): 175-181. [YANG Z Y, YU Y D, WANG J H, et al. Climate change and its impact on water resources in Yixun River Basin. *Advances in Water Science*, 2011, 22(2): 175-181.]
- [20] LIANG X, LETTENMAIER D P. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(D7): 14415-14428.
- [21] 胡彩虹, 郭生练, 彭定志, 等. VIC模型在流域径流模拟中的应用. *人民黄河*, 2005, 27(10): 22-25. [HU C H, GUO S L, PENG D Z, et al. Application of VIC model to basin runoff simulation. *Yellow River*, 2005, 27(10): 22-25.]
- [22] GAO H K, SABO J L, CHEN X H, et al. Landscape heterogeneity and hydrological processes: A review of landscape-based hydrological models. *Landscape Ecology*, 2018, 33(9): 1461-1480.
- [23] YUE S, PILON P, CAVADIAS G. Corrigendum to "Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series". *Journal of Hydrology*, 2002, 262: 254-271.
- [24] 张建云, 章四龙, 王金星, 等. 近50年来中国六大流域年际径流变化趋势研究. *水科学进展*, 2007, 18(2): 230-234. [ZHANG J Y, ZHANG S L, WANG J X, et al. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2): 230-234.]
- [25] MANN H B. Non-parametric tests against trend. *Econometric*, 1945, 13: 163-171.
- [26] KENDALL M G. Rank Correlation Methods. London: Charles Griffin & Co, 1975.
- [27] 白路遥, 荣艳淑. 气候变化对长江、黄河源区水资源的影响. *水资源保护*, 2012, 28(1): 46-70. [BAI L Y, RONG Y S. Impacts of climate change on water resources in source regions of Yangtze River and Yellow River. *Water Resources Protection*, 2012, 28(1): 46-70.]
- [28] ZHAI R, TAO F. Contributions of climate change and human activities to runoff change in seven typical catchments across China. *Science of the Total Environment*, 2017, 605-606: 219-229.
- [29] 赖天铨, 张强, 张正浩, 等. 人类活动与气候变化对东江流域径流变化贡献率定量分析. *中山大学学报: 自然科学版*, 2016, 55(4): 136-145. [LAI T Z, ZHANG Q, ZHANG Z H, et al. Quantitative evaluations of fractional contribution of human activities and changes to the streamflow variations across the East River Basin. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2016, 55(4): 136-145.]

- [30] 史晓亮, 杨志勇, 吕杰, 等. 滦河流域气候变化的水文响应研究. 水土保持研究, 2016, 23(2): 123-127. [SHI X L, YANG Z Y, LYU J, et al. Hydrological response to climate change in Luanhe River Basin. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(2): 123-127.]

Impacts of climate change and human activities on runoff variations in Yixun River Basin

WU Li-yu¹, ZHANG Xuan^{1,2}, LI Chong¹, HAO Fang-hua^{1,2}

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Green Development Institute, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: According to the consistency analysis of meteorological and hydrological series, one natural period (1961-1979) and three impact periods (① 1980-1989, ② 1990-1999 and ③ 2000-2016) have been divided by the Mann-Kendall's test in the Yixun River Basin. The variable infiltration capacity (VIC) model calibrated by the streamflow data in natural period and stepwise method was used to identify the fluctuant impacts of climate change and human activities on the river runoff. Results showed that the climate change in the study area at annual scale was mainly reflected in the significant increase in temperature and there was no obvious trend in precipitation, while the runoff indicated a notable descending trend. Furthermore, the significant increase of precipitation in non-flood season was found at seasonal scale. Climate change and human activities would have significant effects on runoff with the complex mechanism; stepwise method was more appropriate for analyzing the fluctuant impacts than traditional methods. In the period ② with abundant precipitation, the increase of winter rainfall would significantly increase runoff. However, in the period with less precipitation, such as periods ① and ③, the increase of evaporation and the decrease of soil water content would be two factors causing the reduction in runoff. Water consumption reduced runoff in periods ① and ③, and the impact of human activities gradually increased. In period ②, urbanization would be the major effect of the ascending on the runoff. The studies on how climate change and human activities affect the runoff could provide theoretical principal for water resources management and planning in future.

Keywords: climate change; human activities; runoff variations; variable infiltration capacity model; Yixun River Basin