

气候变化和人类活动对滦河流域 内蒙段河川径流的影响分析

王亮^{1,2}, 高瑞忠¹, 刘玉才², 张娜³, 李凤玲¹

(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2.内蒙古兴安盟水文勘测局, 内蒙古 乌兰浩特 137400; 3.阿拉善乌海水文勘测局, 内蒙古 巴彦浩特 750306)

摘要:河川径流不仅受气候因素的直接影响,受人类活动的影响也非常显著。滦河流域内蒙段地处我国干旱半干旱地区,水土流失严重,生态环境恶劣。经分析可知,近50年研究区径流呈明显下降趋势。本文运用SWAT模型研究分析了气候变化和人类活动对河川径流的影响,结果表明流域河川径流受人类活动影响要大于气候变化的影响,其中人类活动的间接影响要大于直接影响。同时验证了SWAT模型在干旱半干旱地区是适用的。

关键词:径流;SWAT模型;气候变化;人类活动;影响分析

中图分类号:TV124

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2014)03-0070-10

1 引言

河川径流是气候条件与流域下垫面综合作用下的产物,因此河川径流不仅受气候因素的直接影响,受人类活动的影响也非常显著,特别是在干旱、半干旱地区,人类活动使河川径流减少的更快,对其影响更为突出。研究区滦河流域内蒙段位于东经 $115^{\circ}51'47''\sim 117^{\circ}17'40''$ 、北纬 $41^{\circ}46'48''\sim 42^{\circ}39'05''$ 之间,流域面积 $6\,950\text{km}^2$ (见图1),地处我国干旱半干旱地区,水土流失严重,生态环境恶劣。近50年研究区径流呈明显下降趋势。20世纪60年代以来,研究区内开展了大规模的水土保持治理工作,这在一定程度上改变了流域下垫面条件。同时,由于降水的减少和气温的不断升高,气候条件的变化使得流域的水文特征也发生了一定的变化。因此实测径流变化中同时包含了气候变化和人类活动两方面的影响。

气候变化和人类活动对径流的影响研究,通常是先对影响导致的后果进行调查,做出定性分析,然后按照实际资料进行定量计算。在分析研究时采用系统分析方法,建立数学模型也是定量研究的重要途径。目

前,根据不同人类活动作用情况及流域尺度大小的不同,河川径流变化成因分析法主要有以下三类^[1]:对比分析法、分项计算组合法、流域水文模拟法。本文根据前人的研究成果,选用SWAT水文模型对此问题进行研究,同时检验该模型在干旱半干旱地区的适用性。

2 气候要素与径流的相关分析

研究区内共有16个降水量测站,各测站位置见图1,



图1 研究区测站分布图

Fig.1 Distribution of the stations in the study area

收稿日期:2013-05-17

基金项目:水利部公益性行业科研专项项目(201001039);内蒙古自然科学基金(2011BS0602);内蒙古重大基础研究开放课题(2011)

作者简介:王亮(1981-),女,蒙古族,内蒙古通辽人,内蒙古农业大学博士,从事水资源评价研究。E-mail:10505055@163.com

通讯作者:高瑞忠(1977-),男,内蒙古阿拉善盟人,内蒙古农业大学副教授,研究生导师,从事水资源评价研究。E-mail:ruizhonggao@sina.com

取各测站降水量的平均值得到研究区平均降水量。研究区内共有 2 个气象测站, 它们分别是蓝旗站和多伦站(位置同雨量站), 同样对两个测站的气温取平均得到研究区平均气温。滦河由多伦出境前没有水文站, 但在河北丰宁县与多伦县交界处有外沟门站。外沟门站控制面积为 8 930km²。由于流域出口断面与外沟门站之间无支流汇入, 因此可通过面积比将外沟门站的径流量折算到流域出口断面处的径流量, 再除以流域面积得到径流深。

2.1 趋势性分析

用 Mann-Kendall 非参数秩次相关法即 M-K 检验法对流域平均年降水量、气温以及径流深进行趋势性分析。

(1)Mann-Kendall 非参数秩次相关法概述。M-K 检验法是一种非参数统计检验法, 与参数检验法相比, 该法无需样本符合一定的分布, 也不受少数特异值的干扰, 并且计算起来相对简单, 是目前常用的气候变量趋势检验法。M-K 检验法的过程为^[2-3]:

对序列 x_1, x_2, \dots, x_n , 先确定所有对偶值 $(x_i, x_j, j > i)$ 中的 $x_i < x_j$ 的出现个数(设为 P)。顺序的 (i, j) 子集是: $(i=1, j=2, 3, 4, \dots, n), (i=2, j=3, 4, 5, \dots, n) \dots, (i=n-1, j=n)$ 。如果按顺序前进的值全部大于前一个值, 这是一种上升趋势, P 为 $(n-1)+(n-2)+\dots+1$, 系为等差级数, 则总和为 $\frac{1}{2}(n-1)n$ 。如果序列全部倒过来, 则 $P=0$, 即为下降趋势。由此可知, 对无趋势的序列, P 的数学期望 $E(P)=\frac{1}{4}(n-1)n$ 。此检验的统计量

$$U = \frac{\tau}{[\text{Var}(\tau)]^{1/2}} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{4P}{n(n-1)} - 1 \quad (2)$$

式中:

$$\text{Var}(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)}$$

当 n 增加, U 很快收敛于标准化正态分布。

原假设为无趋势, 当给定显著水平 α 后, 在正态分布表中查出临界值 $U_{\alpha/2}$, 当 $|U| < U_{\alpha/2}$ 时, 接受原假设即趋势不显著; 当 $|U| > U_{\alpha/2}$ 时, 拒绝原假设, 即趋势显著。

(2)流域平均年降水量、气温和径流深趋势性检验。用 M-K 检验法对流域平均年降水量、气温和径流深进行趋势性检验, 经计算降水量统计值为 $U=-1.63$, 取 $\alpha=0.1$, 则 $U_{\alpha/2}=1.65$, 因为 $|U|=1.63 < 1.65$, 所以趋势性不显著; 气温统计值为 $U=-5.7$, 取 $\alpha=0.01$ 则 $U_{\alpha/2}=$

2.58, 因为 $|U|=5.7 > U_{\alpha/2}=2.58$, 所以研究区平均气温趋势性非常显著; 径流深统计值为 $U=-5.68$, 取 $\alpha=0.01$ 则 $U_{\alpha/2}=2.58$, 因为 $|U|=5.68 > 2.58$, 所以趋势性非常显著。

图 2、3 和 4 分别给出近 50 年流域平均年降水量、气温和径流深变化过程, 表 1 给出各年代平均降水量和气温变化情况, 由此得出如下结论:

平均年降水量多年平均值为 325.4mm, 整体上自 50 年代到 80 年代年均降水量逐年代减少, 但幅度不

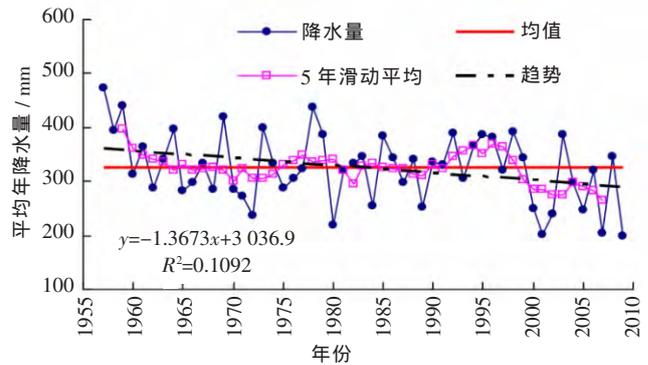


图2 1957~2009年平均降水量变化

Fig.2 Variation of the mean annual precipitation from 1957 to 2009

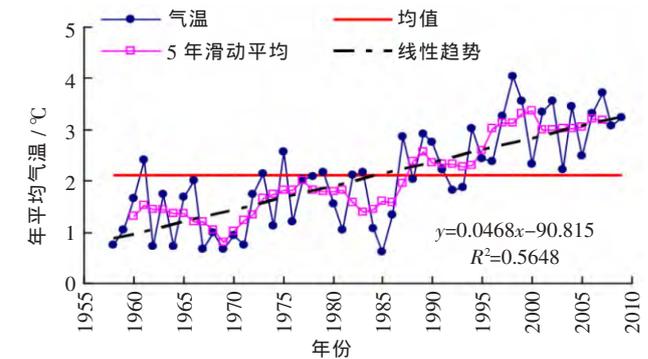


图3 流域 1958~2009 年均气温变化

Fig.3 Variation of the mean annual air temperature from 1958 to 2009

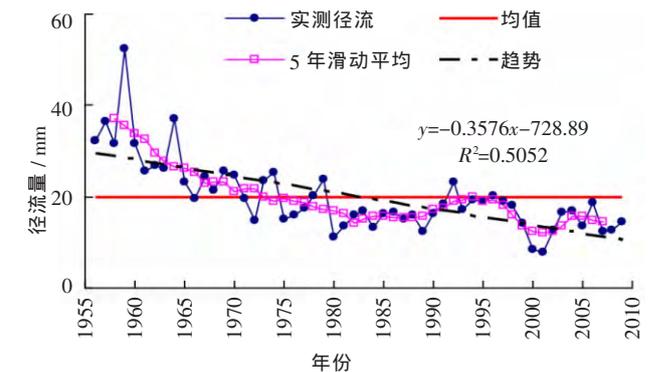


图4 流域出口断面处 1956~2009 年实测径流深变化

Fig.4 Variation of the mean annual runoff depth from 1956 to 2009

表1 1956~2009年各年代平均降水量、气温和径流深变化
Table 1 The mean annual precipitation, air temperature and runoff depth in the various decades from 1956 to 2009

年代	年均降水量 / mm	年均气温 / °C	径流深 / mm
1956~1959	436.7	0.9	38.3
1960~1969	332.5	1.4	26.2
1970~1979	327.2	1.8	20.1
1980~1989	309.3	1.9	14.7
1990~1999	355.2	2.8	18.5
2000~2009	269.5	3.1	13.4
1956~2009	325.4	2.1	20.0

大,其中60、80年代降水量波动较小而70年代波动较大。90年代降水量最大平均为355.2mm,比80年代增加了45.9mm,这一时期年降水量波动较小。近10年降水量总体呈明显下降趋势,是近50年降水量最少的时期,平均为269.5mm,比90年代减少了85.8mm,这一时期年降水量变化波动较大。显然,近50年区域降水总体上呈减少的趋势,降水量减少了71.1mm,平均每年减少1.37mm。

由气温变化过程可明显看出气温呈快速增加的趋势,年均气温为2.1°C,最高气温出现在1998年,为4.13°C,这与1998年全球气温达到最高,同时也是中国近百年以来最暖的一年等结论是一致的,最低气温出现在1985年,为0.70°C。图中年均气温变化波动较大,说明气温的年际变化较大。从各年代对比来看,整体上自50年代到80年代年均气温呈缓慢的上升趋势,而90年代是各年代气温增幅最大的,比80年代年均气温升高0.9°C,而近10年又是呈缓慢上升趋势。总体上近50年来流域年均气温增幅可达2.4°C,平均每年增温0.047°C,气候变暖明显加速,气温上升率大于

全国平均水平,更大于全球近百年来平均增温率,高温现象越来越突出。

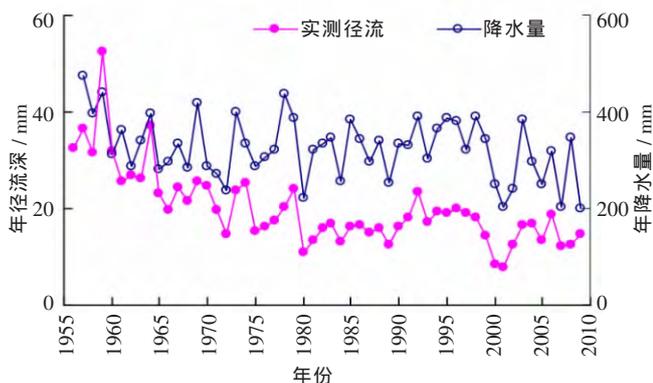
年径流深自50到80年代呈明显下降趋势,而且这期间年径流波动较大。到了90年代径流深有所增加,比80年代增加了3.8mm,近10年又有所减少,比90年代减少了5.1mm,是实测径流最少的年代。总体上近50年来年径流呈明显减少趋势,减少了18.9mm,平均每年减少0.36mm。

2.2 气候要素与径流的关系

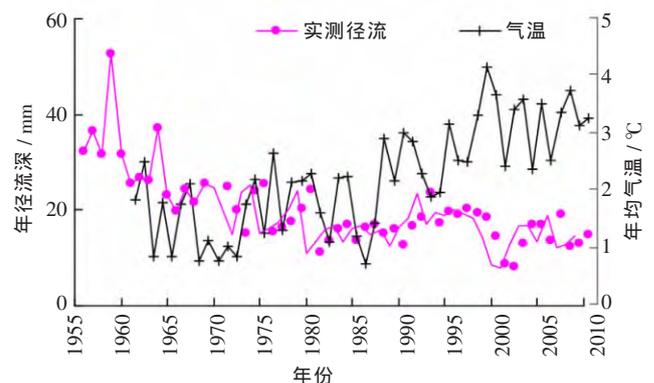
经相关分析可知年径流深与流域平均年降水量、年均气温的相关系数分别为0.71和-0.48,说明径流与降水呈正相关,与气温呈负相关。图5分别给出实测径流与流域平均降水量、气温之间的对应关系,由图以及前面分析可知:降水偏多年径流量也偏多,降水偏少年径流量也偏少,总体上近50年降水的整体减少造成实测径流的减少,说明径流与降水之间有很好的对应关系。气温偏高年径流量偏少,气温偏低年径流量偏高,总体上近50年气温升高使水体的蒸发量加大,造成蒸发环节水的消耗量增加,从而造成实测径流的减少,说明径流与气温之间呈相反变化。且降水变化对径流变化的影响要大于气温变化对径流的影响。

3 气候变化和人类活动对径流影响的分析方法

本文采用流域水文模拟法分析气候变化和人类活动对流域河川径流的影响,首先应根据实测径流的变化特征和流域内人类活动状况将实测径流序列划分为两个阶段:第一个阶段为天然阶段,将此阶段作为基准期,那么该时期的实测径流也相应地作为基准值。第二个阶段为人类活动影响阶段。所以此处的气候变化是指人类活动影响阶段气候要素相对于基准期的改变,



(a) 实测径流与流域平均降水量对应关系



(b) 实测径流与流域平均气温对应关系

图5 实测径流与流域平均降水量、气温之间的对应关系

Fig.5 The corresponding relations between the mean annual runoff depth, precipitation and air temperature

而人类活动指的是第二阶段即人类活动影响阶段土地利用方式、工农业用水量等方面相对于基准期的变化。用第一阶段即天然阶段的水文气象资料来率定水文模型,那么模型参数就可反映人类活动显著影响之前土地利用、用水需求等方面对产流的影响。用率定的模型参数,将人类活动影响阶段的气象资料输入到模型中,则模拟出来的天然径流反映了原始土地利用和用水结构状况下的产流过程。

3.1 径流序列的阶段划分

由于人类活动的影响,水文序列会呈现出阶段性的变化,也就是说原水文序列中会出现跳跃点。通常阶段性划分方法即跳跃成分的检验方法有时序累积值相关曲线法、有序聚类法等^[6]。

(1)时序累积值相关曲线法。设研究序列 $x_i(t=1,2, \dots, n)$, 参证序列 $y_i(t=1,2, \dots, n)$, 两序列时序累积值分别为

$$g_j = \sum_{i=1}^j x_i \quad j=1,2, \dots, n \quad (3)$$

$$m_j = \sum_{i=1}^j y_i \quad j=1,2, \dots, n$$

点绘 $m_j \sim g_j$ 关系图,若研究序列 x_i 跳跃不显著,则 $m_j \sim g_j$ 为一条通过原点的直线,否则为一折线,转折点即为 τ 。

一般情况下可通过建立累积年降雨和累积年径流深的双累积曲线来找出降雨径流机制发生差异的分界点。如果不同年份的点据基本呈一直线,表明径流系列具有很好的一致性;反之则说明受下垫面变化的影响,径流系列的一致性受到破坏^[4]。

图6给出流域1957~2009年降水径流双累积曲线,由图可以看出,曲线的斜率在1973~1976年间发生了转折,将径流序列分为两段,转折点前面的曲线斜

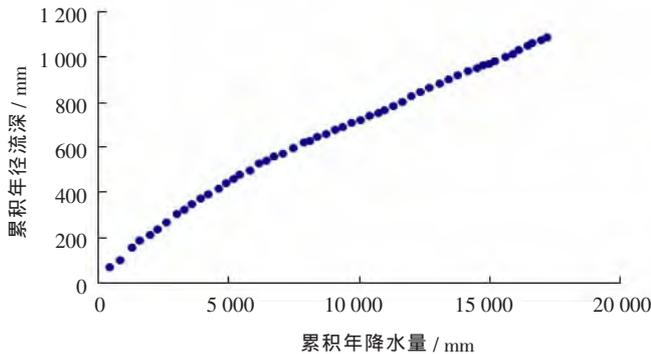


图6 降水径流双累积曲线

Fig.6 Cumulative curve between the precipitation and runoff

率大于转折点后面的曲线斜率,说明受人类活动影响转折点后面的径流明显减少。为了进一步确定天然序列和影响后序列的分界点,下面采用有序聚类分析法来研究。

(2)有序聚类分析法。在分类时若不能打乱次序,这样的分类称为有序分类。以有序分类来推求最可能的干扰点 τ_0 ,其实质是求最优分割点,使同类之间的离差平方和较小,而类与类之间的离差平方和较大。对序列 $x_i(t=1,2, \dots, n)$,最优二分法如下:设可能分割点为 τ ,则分割前后离差平方和表示为:

$$V_\tau = \sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x}_\tau)^2 \quad (4)$$

$$V_{n-\tau} = \sum_{i=\tau+1}^n (x_i - \bar{x}_{n-\tau})^2$$

式中:

$$\bar{x}_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} x_i \quad (5)$$

$$\bar{x}_{n-\tau} = \frac{1}{n-\tau} \sum_{i=\tau+1}^n x_i$$

这样总离差平方和为:

$$S_n(\tau) = V_\tau + V_{n-\tau} \quad (6)$$

最优二分法为:

$$S_n^*(\tau) = \min[S_n(\tau)] \quad (7)$$

满足上述条件的 τ 记为 τ_0 , 以此作为最可能的分割点。

通常情况下,若序列存在两个明显的阶段,那么总离差平方和的时序变化图就会出现单谷底;若序列存在两个以上的明显阶段,那么总离差平方和的时序变化图会出现一个以上的谷底。这样就可以根据谷底出现的时间来划分序列变化的阶段。

为消除降水变化对径流的影响,常用年径流系数

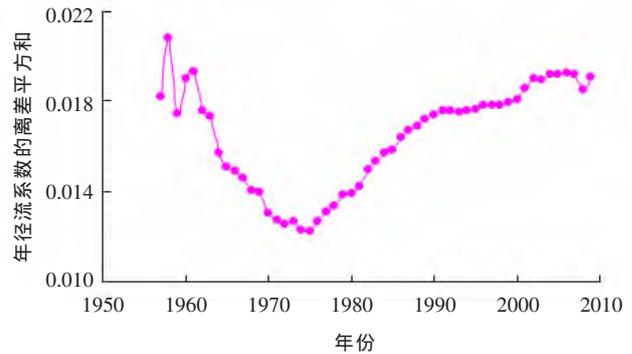


图7 流域实测年径流系数的离差平方和时序变化图

Fig.7 Sum of the deviation squares of the annual runoff coefficient

来分析。图7给出年径流系数的离差平方和时序变化图。由图可知,在1975年流域年径流系数的离差平方和是最小的,所以可以判断该年份为流域径流发生显著变化的分界年。同时经调查在60年代流域内开始了大规模的水土保持实施工作,经前人研究可知,人类活动在流域内引起的下垫面条件的变化并不严格地与水土保持措施实施的时间相吻合,而是在一定程度上要滞后于水土保持措施实施的时间,所以将1975年作为径流序列的分界点是比较合理的。采用1975年之前的资料来建模,并将该时期的实测径流量作为基准,分析气候变化和人类活动对1975年之后径流量的影响。

3.2 分析方法

人类活动影响期间的实测径流与天然时期的基准值间的差值包括两个部分,一是气候变化影响部分,二是人类活动影响部分。这两部分变化对径流变化的影响分析如下^[8-9]:

$$\Delta W_T = W_{HR} - W_B \quad (8)$$

$$\Delta W_H = W_{HR} - W_{HN} \quad (9)$$

$$\Delta W_C = W_{HN} - W_B \quad (10)$$

$$\eta_H = \frac{\Delta W_H}{\Delta W_T} \times 100\% \quad (11)$$

$$\eta_C = \frac{\Delta W_C}{\Delta W_T} \times 100\% \quad (12)$$

式中: ΔW_T 为径流变化总量; ΔW_H 为人类活动对径流的影响量; ΔW_C 为气候变化对径流的影响量; W_B 为天然时期的径流量; W_{HR} 为人类活动影响时期的实测径流量; W_{HN} 为人类活动影响时期的天然径流量(此值由水文模型计算得出); η_H 、 η_C 分别为人类活动和气候变化对径流影响的百分率。

4 基于 SWAT 模型的径流模拟

4.1 SWAT 模型概述

SWAT(Soil and water assessment tool)模型是在20世纪90年代中后期推出的,是由美国农业部农业研究中心(US-DA, Agricultural Research Service)的Jeff Arnold博士研发的一种分布式流域水文模型,它是一个具有物理基础的、以日为时间步长运行的流域尺度的动态模拟模型,可以进行连续多年的模拟计算。SWAT模型可以用来预测模拟大流域长时期内不同的土壤类型、植被覆盖、土地利用方式和管理耕作条件对产水、产沙、水土流失、营养物质运移、非点源污染的影响,甚至在缺乏资料的地区可以利用模型的内部生成器自动填

补缺失资料。SWAT模型以其强大的功能在分布式水文模型中占有重要地位。SWAT模型经过不断改进很快便在水资源和水环境领域得到普及和广泛的认可。Bera和Borah(2003)称之为在以农业和森林为主的流域具有连续模拟能力的具有前途的非点源污染模拟模型。模型主要模块包括气候、水文、土壤温度和属性、植被生长、营养物、杀虫剂和土地管理等^[5-7]。

水文模拟是SWAT模型在流域模拟应用的基础,不仅可模拟流域径流,也可对水量平衡中的各水文要素进行定量分析,从而得到流域的整个水循环过程。流域水文模拟可以分为两个主要部分,第一部分为水文循环的陆地阶段,控制进入河道的水、泥沙和营养物以及杀虫剂的量。第二部分为水文循环的河道演算阶段,可以定义为水和泥沙等在河道中运动至出口的过程。SWAT模型在进行产汇流演算之前,首先借助于ArcGIS9.x或ArcView对空间属性进行处理并构建其他属性数据库。产汇流计算涉及地表径流、土壤水、地下水及河道汇流等环节。SWAT模型按照子流域/水文响应单元计算指令进行分布式产流计算,通过汇流演算命令,运行河网及水库模拟汇流过程;通过叠加命令,把实测数据和源数据输入到模型中同模拟值进行比较;通过输入命令,接受其他模型的输出值;通过转移命令,把某河段(或水库)的水转移到其他河段(或水库)中,也可以直接用作农业灌溉。

SWAT模型自开发以来在美国以及欧洲等国家都得到了广泛的应用,其有效性已经得到多项研究项目证明。SWAT模型在我国的应用研究起步较晚,近几年才得到了快速的发展,但目前SWAT模型在流域水文模拟的适用性研究方面已十分广泛,相关的研究进展国内不少研究者已经进行了详细的介绍与阐述,本文对此不再赘述。

4.2 基于 SWAT 模型的径流模拟

图8给出研究区的地貌DEM图,图9给出提取出的数字河网和子流域的划分图。流域降水、径流和蒸发资料为日数据。其它气象资料如太阳辐射、相对湿度等日数据来源于中国气象科学共享服务网。土地利用来源于2000年遥感和实际调查,土壤类型分布同样来源于遥感和实际调查。同时收集到流域内的一个中型水库西山湾水库的基本属性数据,如水库月出流数据、各特征水位以及对应库容和面积数据等。

由上面径流系列阶段性划分结果可知1975年之前流域内人类活动强度不大,可认为流域在1975年之

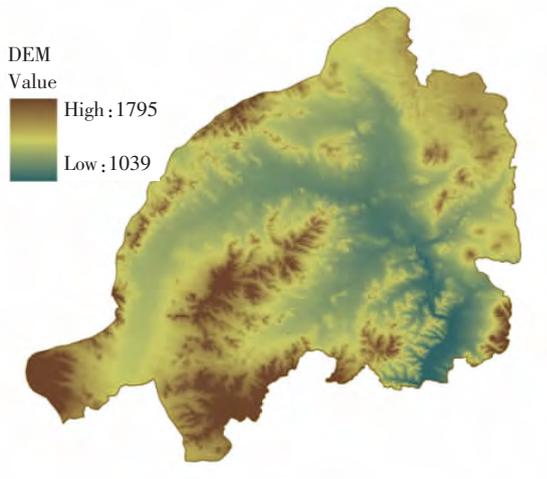


图8 流域地形地貌图

Fig.8 The landform of the basin



图9 数字河网及子流域划分图

Fig.9 The digitstream and subbasins

前的阶段处于天然状态,考虑数据资料获取的完整性,采用流域出口断面 1956~1975 年的径流数据进行模拟。因为模型在运行初期,许多变量像土壤含水量的初始值为零,这对模型模拟结果会产生很大的影响,所以需将模拟初期作为模型运行的预热期,来合理估计模型初始变量。此处将 1956 年作为模型的预热期,1957~1971 年用作模型参数的率定期,1972~1975 年用作模型的验证期。

SWAT 模型参数众多,研究表明在这些参数中,有些参数对模型模拟结果的贡献率很低,但有些参数对模拟结果却很敏感,所以弄清模型的敏感参数后会对模型的应用达到事半功倍的效果。这里根据模型参数的自动敏感性分析大致确定出对模型较为敏感的 6 个参数,通过对率定期流域出口断面逐月径流的模拟,采用 Nash-Sutcliffe 效率系数 E_m 、相关系数 R^2 以及平均相对误差 R_e 三个指标对模型的参数进行率定。

Nash-Sutcliffe 效率系数的表达式为:

$$E_m = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \quad (13)$$

式中: Q_o 为实测流量; Q_p 为模拟流量; \bar{Q}_o 为实测流量的平均值; n 为实测数据个数。当 $Q_o=Q_p$ 时 $E_m=1$,说明效率系数较高。

同时为了考虑水文模拟中的水量平衡,模型率定中常用的另外一个标准是相对误差,它的表达式为:

$$R_e = \frac{P_t - O_t}{O_t} \times 100\% \quad (14)$$

式中: O_t 为实测的平均年径流量; P_t 为模拟的平均年径流量。当 R_e 为正值时,说明模型预测或模拟值偏大;当 R_e 为负值时,则模型预测或模拟值偏小;当 $R_e=0$ 时,说明模型模拟值与实测值完全吻合。

相关系数 R^2 可通过 EXCEL 中的线性回归法求得。当 $R^2=1$ 时表示实测值与模拟值极其吻合,当 $R^2<1$ 时,其值越小说明数据相关程度越低。

很明显通过以上分析可知,当 R^2 越接近于 1, E_m 越接近于 1,同时相对误差 R_e 越接近于 0 时,说明参数的率定相对来讲越准确,模拟的效果越好。

分别将率定期和验证期内月平均流量的实测值和模拟值进行对比,不断调整参数使径流模拟值尽可能接近实测值,通过计算以上三个指标值得出参数最终率定结果见表 2。

图 10 给出了率定期和验证期年径流量模拟值与实测值的对比结果。表 3 给出径流模拟评价结果。由表可知率定期年平均径流量模拟值为 $21\ 997.3 \times 10^4 \text{m}^3$,比年均实测值 $19\ 633.4 \times 10^4 \text{m}^3$ 大 12.04%;验证期各年径流模拟值均大于实测值,验证期年平均径流量模拟值为 $16\ 097.0 \times 10^4 \text{m}^3$,比年均实测值 $13\ 736.6 \times 10^4 \text{m}^3$ 大 17.18%,说明率定期模拟精度比验证期高一些,总体来说年径流的模拟结果在可接受范围内。

图 11 给出率定期月径流模拟值与实测值的对比结果。由图可知,率定期各月径流模拟值与实测值点群变化趋势大体上一致,总体来讲模拟值与实测值的吻合度较高。由表还可以看出率定期月径流的 $E_m=0.78$, $R^2=0.73$,模拟值与实测值年平均误差 $R_e=12.04\%$,评价指标值说明精度满足模拟要求。

表 2 模型参数最终率定值

Table 2 The final calibrated parameters for the model

序号	参数	参数说明	输入文件	值域	最终率定值
1	CN2	SCS 径流曲线系数	mgt	0~100	56
2	ALPHA_BF	基流 α 系数	gw	0~1	0.48
3	ESCO	土壤蒸发补偿系数	hru	0~1	0.93
4	SMTMP	融雪最低气温	bsn	0~5	3.85
5	GW_REVAP	地下水再蒸发系数	gw	0.02~0.2	0.08
6	SMFMN	12月21日融雪系数	bsn	0~10	0.83

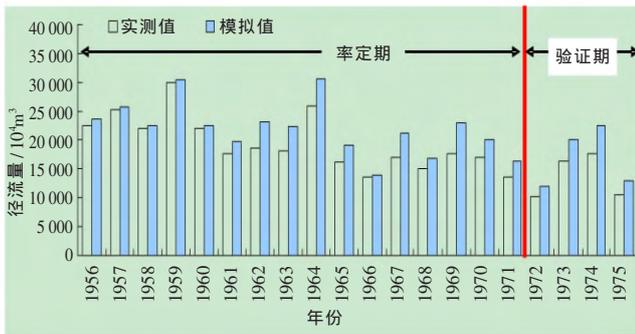


图 10 率定期与验证期年径流实测值与模拟值对比

Fig.10 The measured and simulated annual runoff for calibration and validation period

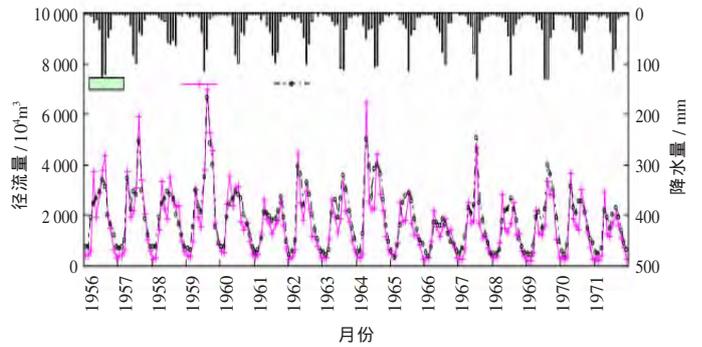


图 11 率定期月径流实测值与模拟值对比

Fig.11 The measured and simulated monthly runoff for calibration period

表 3 月平均径流模拟结果评价

Table 3 The simulated evaluating indicator for monthly mean runoff

阶段	年平均流量 / $10^6 m^3$		E_{ns}	$R_e / \%$	R^2
	实测值	模拟值			
率定期	19 633.4	21 997.3	0.78	12.04	0.73
验证期	13 736.6	16 097.0	0.75	21.01	0.76

图 12 给出验证期月径流模拟值与实测值的对比结果。由表可知验证期月径流的评价指标分别为 $E_{ns}=0.75, R^2=0.76$ ，模拟值与实测值年平均误差 $R_e=21.01\%$ ，精度也满足模拟要求，说明总体上模拟效果较好。总体来讲 SWAT 模型在研究流域具有较好的适用性，采用此模型来还原人类活动影响期间的天然径流量有很高的可信性。

5 气候变化和人类活动对流域河川径流的影响

5.1 人类活动显著影响期间天然径流量的还原

采用率定的参数和 1976 年以后的气象资料模拟 1976~2009 年的径流量，这样就可还原得出人类活动影响期间的天然径流量。图 13 给出月实测径流与模拟径流的对比图。由图可知总体上径流的模拟值在绝大

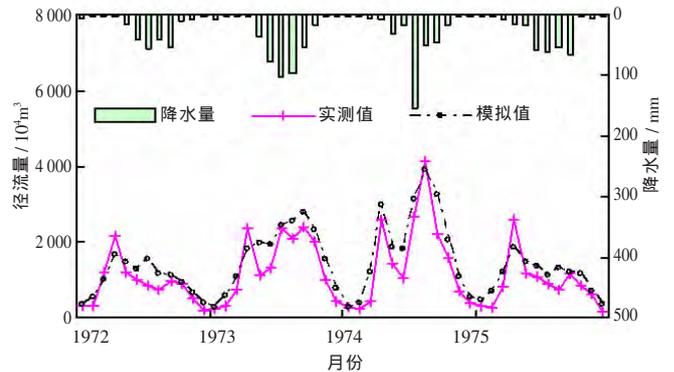


图 12 验证期月径流实测值与模拟值对比

Fig.12 The measured and simulated monthly runoff for validation period

多数月份下要大于实测值，这是因为在此期间气候变化和人类活动对径流的影响造成了实测径流量的减少。图 14 给出人类活动影响时期年径流实测值、模拟值、径流总减少量，由图可知 1976~2009 年流域河川径流发生了明显的变化，实测径流和模拟径流整体上呈递减趋势。

5.2 气候变化和人类活动对河川径流变化的影响分析

上面通过模型对流域 1976~2009 年间的径流量进行了还原，引起径流减少的主要原因有气候因素和人类活动因素，其中人类活动对河川径流量的影响还

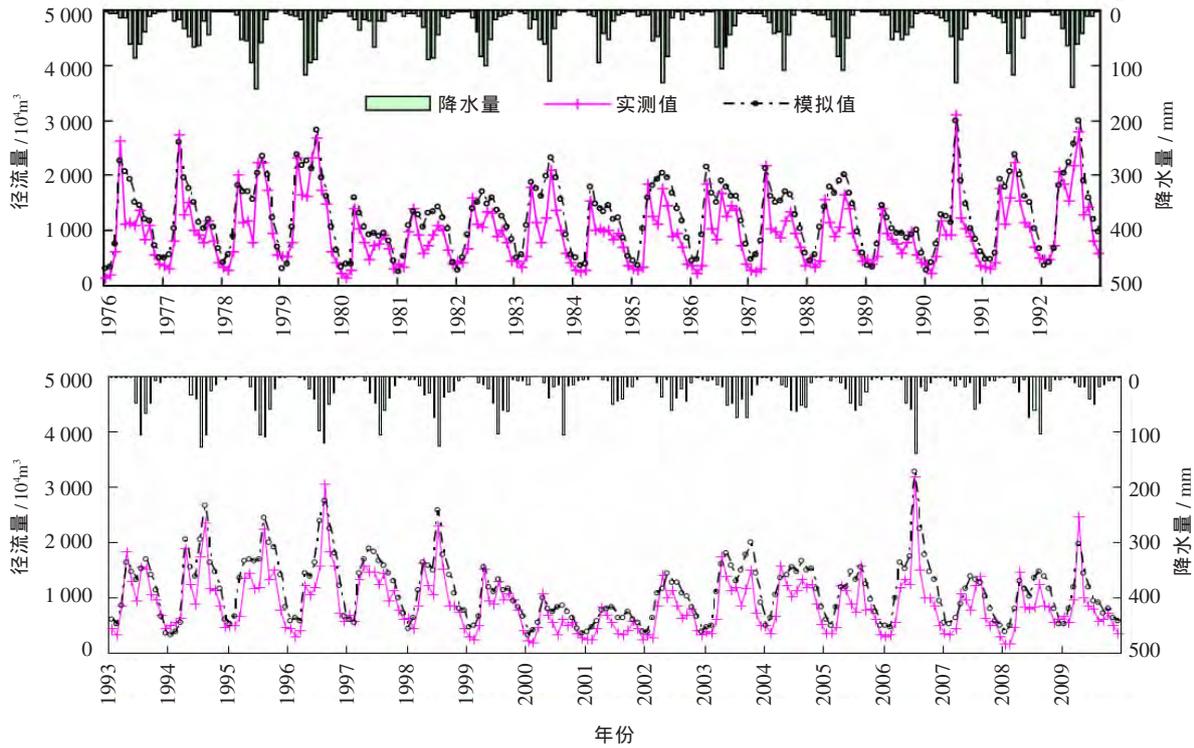


图 13 人类活动影响时期月径流实测值与模拟值对比

Fig.13 Comparison between the measured and simulated monthly runoff from 1976 to 2009

包括直接影响和间接影响。一般直接影响是指随着经济社会的发展,河道外引用消耗的水量不断增加,造成河川径流量的减少。间接影响即由于工农业生产、基础设施建设和水土保持措施改变了流域的下垫面条件(包括植被、土壤、水面、耕地、潜水位等因素),导致流域产汇流条件发生变化,从而间接造成径流量的减少。产流方面,人类活动主要是通过影响蒸散发、入渗等产流量平衡要素来影响产流量;汇流方面,人类活动主要是通过改变流域调蓄作用来影响径流过程的。随着人口的增长和社会经济的发展,研究区内各种用水量激增,研究区内主要用水项目一般有农田灌溉用水、工业用水、城镇生活用水、农村生活用水,水库蓄水。其中工业、城镇生活、农村生活用水都采用地下水,所以研究区由于人类活动直接影响造成的径流减少量为农田灌溉用水和水库蓄水变量之和(见图 14)。

将 1956~1975 年间的径流值作为基准值,通过前面介绍的气候变化和人类活动对径流影响的分析方法,用各年代实测径流量及还原的天然径流量来分析气候变化和人类活动对流域河川径流的影响,其结果见表 4。

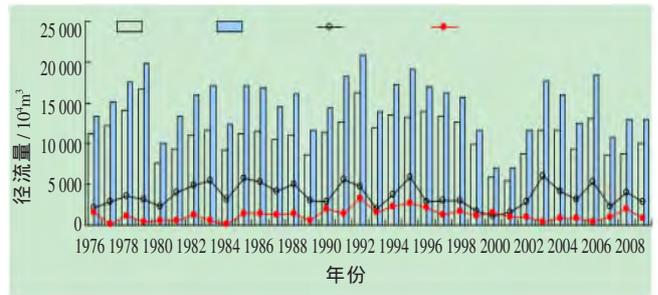


图 14 人类活动影响时期年径流实测值与模拟值对比

Fig.14 Comparison between the measured and simulated annual runoff from 1976 to 2009

由表 4 以及前面气候要素与径流的相关性分析得出以下结论:

- (1)流域基准期即 1956~1975 年平均年降水量为 332.2mm,1976~1979 年较基准期大约增加 9.5%,80 年代降水量较基准期大约减少 6.9%,90 年代又较基准期大约增加 6.9%,而近 10 年的平均年降水量仅为 269.5mm,减少最为明显,较基准期减少大约 18.9%。流域基准期年均气温为 1.5℃,1976~1979 年较基准期大约增温 33.3%,80 年代较基准期大约增温 26.7%,90 年代较基准期大约增温 86.7%,近 10 年较基准期大约

表4 气候变化和人类活动对流域年径流量的影响分析

Table 4 The impact of the climate change and human activities on the runoff

起止年份	年降水量 / mm	年均气温 / °C	径流实测值 / 10 ⁴ m ³	径流模拟值 / 10 ⁴ m ³	径流总减少量 / 10 ⁴ m ³	气候影响		人类活动影响			
								直接影响		间接影响	
						/ 10 ⁴ m ³	/ %	/ 10 ⁴ m ³	/ %	/ 10 ⁴ m ³	/ %
基准值 (1956~1975)	332.2	1.5	17 681.4								
1976~1979	363.6	2.0	13 506.2	16 477.3	4 175.2	1 204.1	28.8	834.0	20.0	2 137.1	51.2
1980~1989	309.3	1.9	10 204.0	14 504.5	7 477.4	3 176.9	42.5	923.7	12.4	3 376.9	45.2
1990~1999	355.2	2.8	12 871.0	16 496.7	4 810.4	1 184.7	24.6	1 980.3	41.2	1 645.4	34.2
2000~2009	269.5	3.1	9 324.8	13 334.8	8 356.6	4 346.6	52.0	1 014.1	12.1	2 995.9	35.9
1976~2009	317.5	2.2	11 118.3	15 107.9	6 563.1	2 573.5	39.2	1 250.5	19.1	2 739.1	41.7

增温 106.7%。

(2)受气候变化和人类活动的影响,各年代径流量较基准期径流量均有所减少,1976~1979年较基准期大约减少 23.6%,90年代又较基准期大约减少 27.2%,而80年代和近10年径流量减少最为明显,较基准期分别减少大约 42.3%和 47.3%。

(3)从各年代影响分析来看,各年代气候变化和人类活动对径流的影响程度是各不相同的。在1976~1979年气候变化对径流的影响量为 28.8%,这一时期降水量的增加以及气温的升高造成径流较基准期有所减少。80年代气候变化对径流的影响量为 42.5%,这一时期降水量较基准期的减少以及气温较基准期的升高造成对径流的影响较 1976~1979年影响大一些。由于1976~1979年和80年代流域内农业用水量还不是很大,而这一时期也正是流域内水土保持措施大力实施的阶段,从而使得人类活动的间接影响所占比重较大,分别为 51.2%和 45.2%。

90年代气候变化对径流的影响最小,其影响量为 24.6%,这一时期降水量较基准期有所增加,但气温较基准期有很大的升高,造成径流较基准期有所减少。这一时期人类活动对径流的影响起到了主导作用,由于这一时期流域内用水量的激增使得径流还原量明显增大,也只有在这一年代人类活动对径流的直接影响量最大,为 41.2%。

近10年气候变化和人类活动对径流的影响程度相当,其中气候变化的影响量稍大一些,占总影响量的 52.0%,分析其原因是由于这一时期降水量的显著减少以及气温的明显升高对径流量的减少起到了关键作用。

(4)总体上自 1976~2009年间气候变化对径流减少的贡献率为 39.2%,人类活动的影响是造成河川径流量减少的主要原因,占总影响量的 60.8%,其中以水土保持措施为主的人类活动的间接影响量大约为直接影响量的两倍。

(5)通过以上对流域降水、气温、河川径流的分析可知,降水变化是造成流域河川径流变化的主要气候因素,但人类活动如以农业灌溉为主的水资源利用的直接影响以及水土保持措施的实施对流域水资源的间接影响是造成河川径流明显减少的主要原因。

5 结论

本文应用 SWAT 模型对气候变化和人类活动对河川径流的影响进行了分析,主要得出结论如下:

(1)用 M-K 检验法对流域平均年降水量、气温以及径流深进行了趋势性分析,并通过相关分析得出径流与降水呈正相关,与气温呈负相关,且降水变化对径流变化的影响要大于气温变化对径流的影响。

(2)由于人类活动的影响,使得径流序列呈现阶段性。采用有序聚类分析法找到径流系列的分界点,这样就得到人类活动显著影响时期为 1976~2009年。

(3)以 1956~1971年为率定期,1972~1975年为验证期,用 SWAT 模型对径流进行模拟,通过实测值与模拟值的对比分析可知精度满足模拟要求,说明总体上 SWAT 模型模拟效果较好,此模型在研究区的适用性较高。

(4)采用率定的参数和 1976年以后的气象资料模拟 1976~2009年的径流量,还原得出人类活动影响期

间的天然径流量。

(5)将 1956~1975 年间的径流值作为基准值,通过文中介绍的气候变化和人类活动对径流影响的分析方法,用 1976~2009 年间各年代实测径流量以及由 SWAT 模型还原的天然径流量来分析气候变化和人类活动对流域河川径流的影响。结果表明流域河川径流受人类活动影响要大于气候变化的影响,其中人类活动的间接影响要大于直接影响。

参考文献:

- [1] 王国庆. 气候变化对黄河中游水文水资源影响的关键问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (WANG Guoqing. Impacts of Climate Change on Hydrology and Water Resources in the Middle Reaches of the Yellow River Basin[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [2] 牛存稳. 华北地区降水时空变异及其典型流域水文响应[D]. 武汉: 武汉大学, 2004. (NIU Cunwen. Temporal Evolution and Spatial Pattern in North China and Its Hydrological Response [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese))
- [3] 康淑媛, 张勃, 柳景峰, 等. 基于 Mann-Kendall 法的张掖市降水量时空分布规律分析 [J]. 资源科学, 2009, 31 (3): 501-508. (KANG Shuyuan, ZHANG BO, LIU Jingfeng, et al. Analysis of the spatiotemporal distribution of precipitation in Zhangye city using Mann-Kendall method [J]. Resources Science, 2009, 31(3): 501-508. (in Chinese))
- [4] 刘双林, 张婷. 降雨径流系列的一致性分析[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2004, 5(4): 19-21. (LIU Shuanglin, ZHANG Ting. Analysis on the consistence of rainfall runoff series [J]. Changchun Inst. Tech. (Nat. Sci. Ed.), 2004, 5(4): 19-21. (in Chinese))
- [5] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22 (1): 79-86. (WANG Zhonggen, LIU Changming, HUANG Youbo. The theory of SWAT model and its application in Heihe basin[J]. Progress in Geography, 2003, 22(1): 79-86. (in Chinese))
- [6] 秦耀民, 胥彦玲, 李怀恩. 基于 SWAT 模型的黑河流域不同土地利用情景的非点源污染研究[J]. 环境科学学报, 2009, 29(2): 440-448. (QIN Yaomin, XU Yanling, LI Huaen. SWAT model of non-point source pollution under different land use scenarios in the Heihe river basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29 (2): 440-448. (in Chinese))
- [7] 张东, 张万昌, 朱利, 等. SWAT 分布式流域水文物理模型的改进及应用研究[J]. 地理科学, 2005, 25(4): 434-440. (ZHANG Dong, ZHANG WanChang, ZHU Li, et al. Improvement and application of SWAT: a physically based, distributed hydrological model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(4): 434-440. (in Chinese))
- [8] 水利部应对气候变化研究中心. 气候变化对水文水资源影响研究综述 [J]. 中国水利, 2008, (2). (Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources. Review on studies for climate change impacting on hydrology and water resources [J]. China Water Resources, 2008, (2). (in Chinese))
- [9] 王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析 [J]. 中国水利, 2008, (2). (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, LIU Jiufu, et al. Quantitative assessment for climate change and human activities impact on river runoff [J]. China Water Resources, 2008, (2). (in Chinese))

Impact of Climate Change and Human Activities on Runoff in Neimeng Reach of Luanhe River

WANG Liang^{1,2}, GAO Ruizhong¹, LIU Yucai², ZHANG Na³, LI Fengling¹

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China;

2. Xinganmeng Hydrology Bureau, Wulanhot 137400, China; 3. Aalshan Wuhai Hydrology Bureau, Bayanhot 750306, China)

Abstract: Runoff is not only impacted by the climate change but also impacted by the human activities. The Luanhe River Basin in Inner Mongolia is located in the arid and semiarid areas of China, where there is serious water and soil loss and the environment is badly damaged. According to the analysis, the runoff is in descend trend in resent 50 years. In this paper, the SWAT hydrological model was employed to analyze the impact of climate change and human activities on runoff. The result shows that the impact of human activities is larger than climate change, and the indirect human activities are the main reasons for runoff reduction.

Key words: runoff; SWAT model; climate change; human activity; impact analysis