

气候变化和人类活动对大凌河上游流域径流的影响

吴 丽¹, 张爱静²

(1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 大连理工大学水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:通过趋势分析方法及突变点检验方法,分析大凌河流域水文气象要素的变化趋势;结合大凌河流域人类活特征及突变点分析结果,将流域径流量序列划分为“天然基准期”和“人类活动影响期”两个阶段;应用大凌河上游水文、气象、土地利用等数据建立大凌河上游水文模型,采用弹性系数法和水文模拟法定量分析大凌河上游流域气候变化和人类活动对径流的影响。结果表明:1956—2006 年,大凌河流域降水量有轻微的上升趋势,而潜在蒸发量与径流量呈现显著下降趋势,导致径流量减小的主要原因为人类活动。

关键词:气候变化;人类活动;径流变化;水文模型;大凌河流域

中图分类号:P333.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)02-0010-06

Effects of climate change and human activities on runoff in upper Daling River Basin//WU Li¹, ZHANG Aijing²
(1. School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the trend analysis method and the change-point testing method, trends of the hydro-meteorological elements for the Daling River Basin were detected. The annual runoff time series was divided into a “natural period” and an “impacted period” based on the human activities characteristics and change point analysis results for the river basin. A hydrological model was established based on hydrological, meteorological, and land use data from the upper Daling River Basin. Through the elastic coefficient method and hydrological simulation method, the effects of climate change and human activities on runoff in the study area were analyzed quantitatively. The results show that the precipitation of the study area has been increasing slightly during 1956—2006, and the potential evapotranspiration and runoff show a significant decreasing trend, mainly due to human activities.

Key words: climate change; human activities; runoff change; hydrological model; Daling River Basin

大凌河年径流量近年来逐年减小,从 20 世纪 60 年代的 10 亿 m³ 降到了 2008 年的 1.7 亿 m³。水资源匮乏使得流域上下游水资源供需矛盾突出、地下水超采过度,并导致了水污染、水土流失等生态环境问题,很大程度上制约了流域内经济、社会的发展^[1]。分析流域径流量变化的影响因素,对流域水资源的合理开发利用、经济发展及生态建设具有重要意义。

河川径流变化受气候、下垫面、人类活动等多方面因素影响,气候变化与人类活动是河流径流量变化的主要影响因素^[2]。国内学者对大凌河流域的水资源开发利用状况^[1]、径流量变化趋势以及径流量下降因素等做了不少定性分析研究^[3-5],而定量分析气候变化与人类活动对径流影响的研究相对匮乏。径流变化的研究对流域水资源规划具有重要的

意义,如果人类活动是导致径流量减小的主要原因,则当前的水文气象数据仍可用于水资源规划;若气候变化是导致径流量减少的主要因素,则需研究未来气候变化对水资源的影响。政府根据人类活动与气候变化对水资源的影响情况制定相应的宏观调控政策为流域水资源规划提供參考^[6]。

大凌河是辽宁省西部最大的河流,发源于葫芦岛市建昌县黑山北的水泉沟,河流总体流向呈西东向,流经朝阳、北票、义县、凌海等市县,于凌海市的南圈河和南井子之间注入渤海,全长 435 km,流域面积 22.33 万 km²。朝阳水文站位于大凌河中游,控制流域面积 1.02 万 km²,其上游区域多年平均降水量为 486.9 mm,多年平均潜在蒸发量为 1215.5 mm。流域多荒山秃岭,气候干旱,是辽宁省内严重的资源性缺水地区。本文根据朝阳水文站水文资料,采用

Mann-Kendall 检验法分析大凌河流域水文气象要素的变化趋势,进而分析导致径流量变化的原因;采用弹性系数法和水文模拟法定量分析气候变化和人类活动对径流的影响。

1 研究方法和资料

1.1 数据选取

为分析和检验大凌河流域水文气象要素的变化趋势,采用大凌河流域的朝阳水文站、10 个雨量站和 6 个气象站资料进行研究(图 1)。气象数据有 1956—2006 年的月最大和最小降水量、月平均气温、相对湿度、风速和日照时数。潜在蒸发量采用联合国粮食与农业组织(FAO)推荐的 Penman-Monteith 公式计算。研究区的面平均降水量和潜在蒸发量采用泰森多边形法计算。

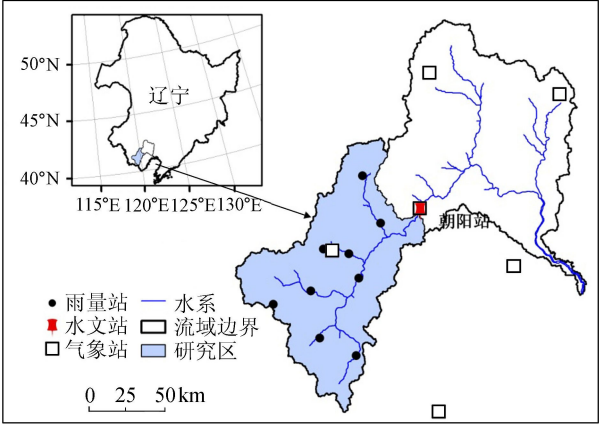


图 1 大凌河流域水系及水文、气象站分布

土地覆被资料采用中国科学院资源环境科学数据中心提供的 1980—2010 年的 1 : 10 万土地利用数据;流域 1 : 100 万的土壤分布图由中国科学院资源环境科学数据中心提供;SRTM 90 m 精度的 DEM 数据由中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站提供。为分析气候变化与人类活动对大凌河流域径流的影响,先采用 Mann-Whitney-Pettitt 突变点分析法对数据进行预处理,采用 Mann-Kendall 法检验数据的趋势性,最后应用弹性系数法和水文模拟法分析气候变化和人类活动对径流的定量影响。

1.2 Mann-Whitney-Pettitt 突变点分析法

Pettitt^[7]提出的 Mann-Whitney-Pettitt 突变点分析法是检验时间序列突变点的非参数统计方法,该方法可分析出突变点发生的最可能位置,并且能判断突变点的显著性。Mann-Whitney-Pettitt 方法基于 Mann-Whitney 统计函数 $U_{t,n}$,认为两个样本序列 $x_1, x_2, \dots, x_t$ 与 $x_{t+1}, \dots, x_n$ 来自于同一序列分布, $U_{t,n}$ 计算公式如下:

$$U_{t,n} = U_{t-1,n} + \sum_{i=1}^n \text{sgn}(x_t - x_i) \quad (t = 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

其中

$$\text{sgn}(x_t - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_t - x_i) > 0 \\ 0 & (x_t - x_i) = 0 \\ -1 & (x_t - x_i) < 0 \end{cases}$$

式中: x_i 为统计样本; t 为时间长度; n 为序列长。

当 $|U_{t,n}|$ 达到最大值时, t 为可能的突变点,突变点 t 的近似的显著性统计量 p_t 为

$$p_t \cong 2\exp[-6U_{t,n}^2/(n^3 + n^2)] \quad (2)$$

给定显著性水平 α , 如 $p_t < \alpha$ 则认为该序列在显著性 α 水平下发生显著突变。为验证突变点的可靠性,本文采用双样本 t 检验法判断序列 X 在突变点前后变化的显著性。

1.3 Mann-Kendall (MK) 检验

MK 检验^[8-9]是常用的时间序列趋势检验方法之一,适用于检验非正态分布序列的趋势性。当数据样本不遵从分布规律时,可利用 MK 法将少数异常值剔除。设水文序列 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, MK 检验统计量 Z 由下式计算:

$$Z = \begin{cases} (S - 1)/\sqrt{\text{var}(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S + 1)/\sqrt{\text{var}(S)} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中

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

$$\text{var}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5) \right]$$

当 $Z > 0$ (或 < 0) 时,表示水文序列 X 呈上升(或下降)趋势。给定显著性水平 α , 如果 $|Z| > Z_{(1-\alpha/2)}$ ($Z_{(1-\alpha/2)}$ 为概率超过 $\alpha/2$ 的标准正态分布值) 则表明序列 X 存在趋势性, 否则接受 X 序列无趋势的假设。

为量化时间序列的变化程度,计算各水文气象要素序列的 Sen 氏斜率 (Sen's slope)^[10-11]:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_j - x_k}{j - k} \right) \quad (1 < k < j < n) \quad (4)$$

式中: $\text{median}(\cdot)$ 为中值函数; β 为 Sen 氏斜率; x_k 和 x_j 分别为 k, j 时刻的序列值。 β 值的正、负分别代表趋势的上升和下降。

鉴于水文气象要素的时间序列往往具有自相关性,在趋势检验前,应用 Trend-free pre-whitening 法^[12-15]对水文时间序列进行预处理。

1.4 人类活动及气候变化对径流影响估算方法

1.4.1 弹性系数法

以流域天然时期的实测径流量作为基准值,则人类活动影响时期实测径流量与基准值之间的差值是环境变化导致的^[1],包括人类活动影响部分与气候变化影响部分:

$$\Delta R_E = R_M - R_B = R_C + R_H \tag{5}$$

式中: ΔR_E 为径流量变化总量; R_M 为实测值; R_B 为基准值; R_C 为气候变化引起的径流量变化量; R_H 人类活动对径流的影响量。其中 R_C 可由 Milly 等^[16]提出的方法计算:

$$R_C = \frac{\partial R}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial R}{\partial E_0} \Delta E_0 \tag{6}$$

式中: ΔP 和 ΔE_0 分别为降水量及潜在蒸散发的变化量; $\partial R/\partial P$ 和 $\partial R/\partial E_0$ 分别为径流对降水量及潜在蒸散发的敏感系数。根据式(5),可以定量计算出人类活动和气候变化对流域径流的影响。

1.4.2 水文模拟法

水文模拟法首先建立合适的流域水文模型,利用无人类活动影响或者人类活动影响显著前的实测水文气象资料率定水文模型参数,并认为这些参数基本上反映流域的天然产流状况;保持模型参数不变,将人类活动影响显著期间的气象要素输入到水文模型,计算延展相应时期的天然径流量;最后通过对比人类活动影响期间的实测径流量、还原的天然径流量和基准时期的实测流量,分离人类活动影响期间各因素对流域径流的影响。

水文模拟法要求选取的水文模型具有较高的精度和较好的适应性,并且能够兼顾研究问题的复杂性。由美国农业部农业研究中心开发的 SWAT(soil and water assessment tool) 模型^[17]被广泛应用于国内外流域,结果显示该模型具有较好的适应性。与其他模型相比,SWAT 模型定量分析气候变化与人类活动对流域径流的影响时,不仅可以考虑降水和气温的变化,并且能综合考虑湿度、风速、太阳辐射等气象因子的变化,因此选用 SWAT 模型进行流域水文模拟。

以流域天然时段的实测径流量作为基准值,气候变化引起的径流量变化量与人类活动引起的径流量变化量满足式(5)(6)。人类活动与气候变化对径流影响的贡献率可以由下式计算:

$$\eta_H = \frac{R_H}{\Delta R_E} \times 100\% \tag{7}$$

$$\eta_C = \frac{R_C}{\Delta R_E} \times 100\% \tag{8}$$

其中 $R_H = R_{SWH} - R_{OWH}$

式中: η_H 、 η_C 分别为人类活动和气候变化对径流影响的贡献率; R_{SWH} 为人类活动影响期还原的天然径流量; R_{OWH} 为流域人类活动阶段的实测径流量。

2 结果与分析

2.1 降水量、径流量、潜在蒸发量的历史变化趋势

大凌河流域降水主要集中在汛期,主汛期 7、8 月的降水量超过全年降水量的 50%,其中 7 月降水量最大,约 150 mm。受降水年内分布影响,流域径流量主要集中在汛期,峰值流量出现在 8 月,滞后月最大降水量 1 个月,主汛期 7、8 月径流量接近全年径流量的 50%。11 月至次年 3 月潜在蒸发量较小,不足 50 mm。图 2 为朝阳站实测径流量及该站以上区域多年平均降水量和潜在蒸发量的年内分配过程。

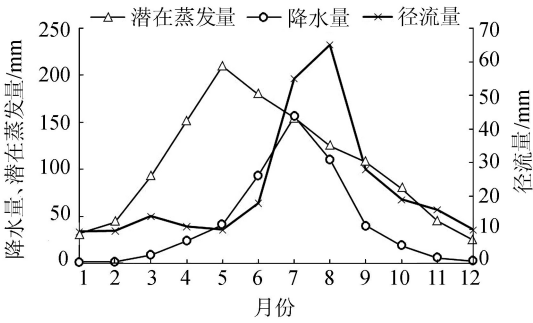


图2 朝阳站降水量、径流量和潜在蒸发量的年内分配

流域多年降水量、径流量、潜在蒸发量过程线以及径流量距平值如图 3 所示。根据 Mann-Whitney-Pettitt 变点分析方法及 MK 秩次相关检验法得出流域多年降水量、潜在蒸发量、径流量的趋势及突变检验结果如表 1 所示。

表1 年降水量、径流量和潜在蒸发量趋势检验结果

要素	多年平均值/ mm	变化率/ (mm·a ⁻¹)	MK 检验 Z 值
降水量	486.9	0.24	0.10
径流量	65.2	-1.23	-3.55
潜在蒸发量	1215.5	-4.80	-5.20

显著性水平 $\alpha=0.05$ 下检验结果显示,大凌河上游流域降水量呈现较小的上升趋势,变化较为平缓,变化率为 0.24 mm/a;径流量具有显著的下降趋势,变化率为 -1.23 mm/a;潜在蒸发量呈现出显著的下降趋势,变化率为 -4.8 mm/a;从径流量距平图看出,朝阳站径流量的减小趋势从 20 世纪 70 年代中后期开始。一般地,径流量与降水量呈正相关,与蒸发量呈负相关^[18],而趋势检验结果表明研究区内,年降水量略有上升,蒸发量显著减小,按原有规律,径流量应该有所增加,但实测值却呈现出显著下降趋势,可以推断降水与蒸发的变化并不是导致该流域径流量下降的原因。

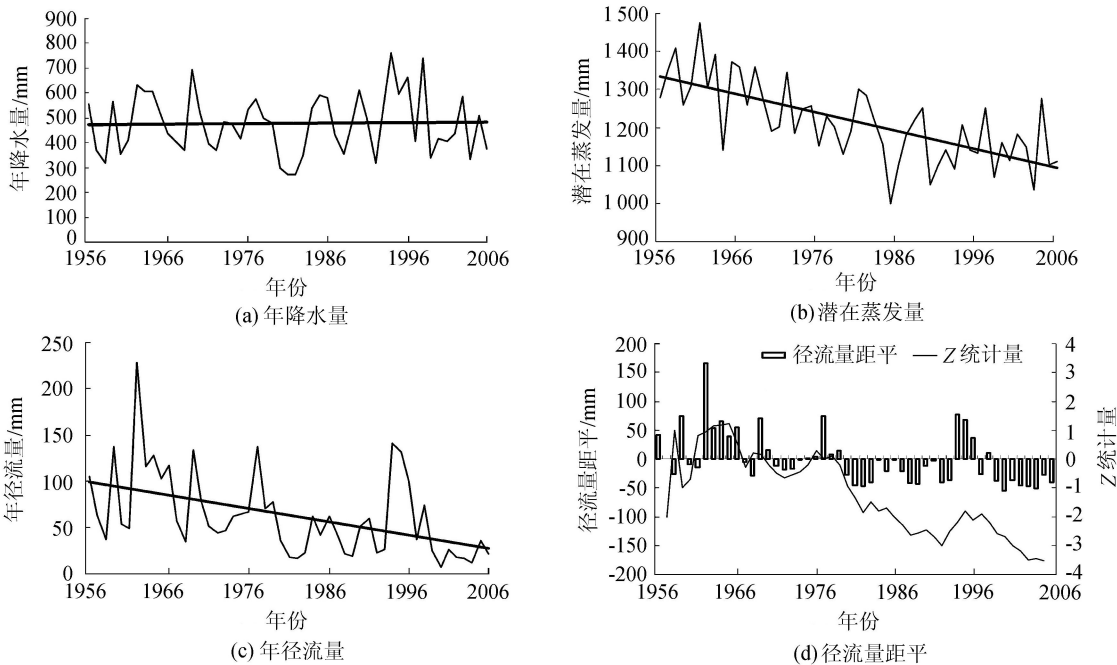


图3 研究区 1956—2006 年降水量、径流量、潜在蒸发量过程线及径流量距平

2.2 降水量、径流量序列突变点分析

采用 Mann-Whitney-Pettitt 突变点方法识别出大凌河流域降水量、径流量的突变点,并采用双样本 T 检验法检验突变点前后序列的一致性。经检验,降水量的突变点在 1961 年, $p_t = 0.653$;径流量的突变点在 1979 年, $p_t = 0.001$ 。给定显著性水平 $\alpha = 0.05$,只有径流量序列发生了显著突变,并且双样本 T 检验结果也表明只有径流量序列在突变点后显著下降。所以,大凌河流域径流量的突变并不是由于降水的突变导致的。

相关研究表明,剧烈的人类活动改变了大凌河上游的径流量^[3]。根据突变点检验结果,本文将 1956—1979 年定义为天然基准期,1980—2006 年定义为人类活动影响期。为了比较两种计算方法中人类活动及气候变化的不同影响,结合大凌河流域经济发展及水利建设,将人类活动影响期划分为 1980—1989 年、1990—1999 年、2000—2006 年 3 个研究时段。

2.3 气候变化与人类活动对径流的影响

2.3.1 SWAT 模型的率定与验证

采用天然阶段的流域水文气象资料构建 SWAT 模型,以 1956—1958 年作为模型的预热期,以 1959—1962 年的水文气象数据进行模型参数率定,以 1963—1966 年的水文气象数据验证模型模拟结果。采用纳什效率系数 E_{ns} 、相关系数 R^2 和相对误差 R_e 3 个评价指标来评价 SWAT 模型的适应性^[19-20]。SWAT 模型大凌河朝阳站率定期与验证期的月模拟结果及评价指标如图 4 与表 2 所示。

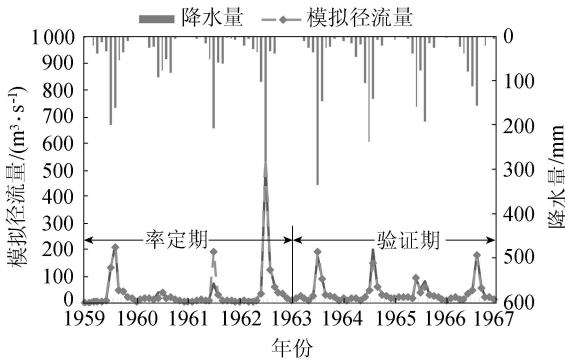


图4 朝阳站径流月模拟结果

表2 朝阳站月模拟结果评价指标

计算期	E_{ns}	R^2	R_e
率定期	0.92	0.96	0.05
验证期	0.83	0.92	0.07

模拟结果显示,SWAT 模型率定期与验证期的 R_e 均小于 10%, R^2 均大于 0.9, E_{ns} 在率定期大于 0.9,验证期也在 0.8 以上。根据文献[20]给定的评价标准,SWAT 模型在大凌河流域上游具有较好的适应性。

2.3.2 流域水文模拟法径流量还原计算

保持模型参数不变,将 1956—2006 年的气象要素输入到建立的水文模型,模拟相应时期的天然径流量,模拟结果如图 5 所示。由图 5 可知,随着时间的变化,实测流量与模拟流量之间的差值越来越大,且实测流量均小于模拟流量,与前面的分析吻合。这也反映出人类活动对径流的影响程度越来越大。

2.3.3 气候变化和人类活动对径流的影响

根据模拟结果,采用弹性系数法及水文模拟法

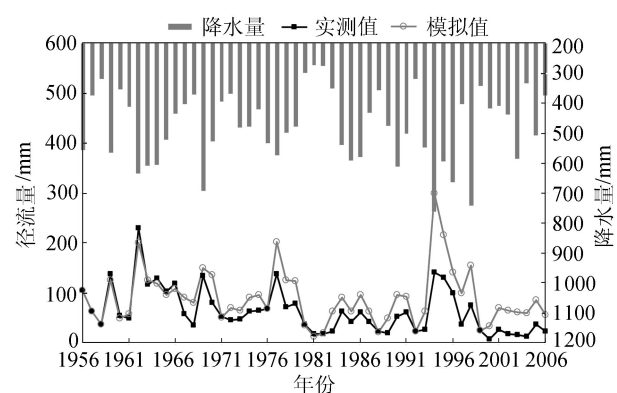


图5 朝阳站年径流模拟结果

计算得到大凌河上游流域气候变化以及人类活动对年径流影响的贡献量,计算结果见表3。

从计算结果可以看出,相对于天然基准期,在径流量发生突变以后的整个人类活动影响期(1980—2006年),两种计算方法得到的气候变化与人类活动对径流影响的贡献量比较一致。相对于天然阶段,1980—2006年大凌河流域径流量下降47.0 mm/a,而同期降水量上升4.5 mm/a,潜在蒸发量下降8.9 mm/a。弹性系数法计算出大凌河流域气候变化与人类活动对径流量变化的贡献量分别为-10.7%和110.7%,水文模拟法计算出的结果为-8.9%和108.9%。气候变化导致径流量增大,人类活动导致径流量减小,气候变化导致径流量增大的幅度远小于人类活动导致径流量减小的幅度。

在20世纪80和90年代,两种计算方法得到的计算结果也基本一致。20世纪80年代大凌河流域降水量较基准期增大了13.9%,潜在蒸发量较基准期减小了6.6%,径流深却较基准期减小了53.2%,属于严重枯水期,20世纪90年代大凌河流域降水量较基准期增大了6.0%,潜在蒸发量较基准期减小了11.1%,径流深较基准期减小了19.8%。从表4分析得知20世纪80年代气候变化和人类活动都导致径流量减小,20世纪90年代气候变化导致径流量增大,人类活动导致径流量减小,两段时期人类活动对径流量的减小均起到了决定性的作用。2000—2006年降水量较基准期减小了7.5%,潜在蒸发量较基准期减小了10.8%,径流量较基准期减

小了64.1%。

2.4 主要人类活动影响分析

人类活动加剧了区域径流量的减小,成为流域径流量减小的主要驱动因素。人类活动对径流的影响主要表现在城市面积的增大,增大不透水面积,减小入渗,增大洪峰流量;农业生产造成灌溉用水量增加,修建水库塘坝造成河流径流量减小等方面。分析大凌河流域人类活动对流域径流造成的影响,主要包含3个方面:

a. 已有研究结果显示森林覆盖度的提高会使得流域径流量减小^[21-22],耕地面积增加造成灌溉用水量增大。从大凌河流域土地利用变化看出,1987—2002年大凌河流域最主要农业景观变化是农田和未利用荒地面积不断减小,而林地、果园及草地面积不断增大,到2002年林地、果园、农田和草地分别占总面积的41.2%、12.7%、12.7%和15.3%^[4]。虽然农田面积减小,但旱田减小,灌溉田、坝田面积增大,用水量增大;林地、果园面积的增加减小径流量,所以大凌河流域土地的变化会造成大凌河流域径流量的减小。

b. 水利工程的截流和蒸散发损失是大凌河上游河道径流量减小的另一原因。大凌河上游建有大型水库2座,总库容2.63亿m³;中型水库2座,总库容0.16亿m³;小型水库29座,塘坝、提灌站及石河堰等小型水利设施不计其数,所以上游的截留是大凌河流域径流量减小的重要因素。

c. 除土地利用、覆被变化和水利工程修建外,人工取用水也是大凌河流域径流量逐年下降的驱动因素。统计大凌河流域1980年以后用水资料发现,大凌河的用水量呈明显上升趋势,朝阳水文站控制的朝阳市总用水量从1980年的2.01亿m³增长到2006年的3.76亿m³,增长幅度达87%,其中,城镇用水量的增长占比最大。农业用水消耗水量占比最大,约占总用水量的44.67%,其余依次为工业用水、城镇用水及农村用水。这表明,随朝阳市城市化进程加快,城镇人口数量增加,最终导致用水量增加。因此,大凌河流域径流量减小的人类影响主要包括土地利用变化、水利设施修建及取用水的增加。

表3 气候变化与人类活动对年径流影响的贡献量

时 段	弹性系数法				水文模拟法			
	气候变化影响		人类活动影响		气候变化影响		人类活动影响	
	$\Delta R_C / (\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	$\eta_C / \%$	$\Delta R_H / (\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	$\eta_H / \%$	$\Delta R_C / (\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	$\eta_C / \%$	$\Delta R_H / (\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	$\eta_H / \%$
1980—1989年	-8.4	15.8	-44.8	84.2	-26.6	50.1	-26.5	49.9
1990—1999年	17.3	-87.0	-37.2	187.0	41.5	-208.5	-61.4	308.5
2000—2006年	2.6	-4.0	-66.8	104.0	-11.5	17.8	-52.8	82.2
1980—2006年	4.5	-10.7	-47.0	110.7	3.8	-8.9	-46.2	108.9

3 结 论

- a. 1956—2006 年间,大凌河上游径流量与潜在蒸发量有显著下降趋势,而降水量变化趋势不明显。
- b. 采用 Pettitt 突变点分析法分析可知 1980 年为径流量序列突变点,结合对研究区其他影响因素的分析,可将径流量序列划分为天然基准期(1980 年以前)与人类活动影响期(1980 年及以后)。
- c. 分别采用弹性系数法与水文模拟法对大凌河流域人类活动与气候变化对径流的影响进行定量分析,两种方法得出较一致的结果:人类活动导致径流量减小,气候变化导致径流量稍有增大,其中人类活动占主导作用。大凌河上游径流量的减小主要是由人类活动引起的,人类影响主要包括土地利用变化、水利设施修建及取水量的增加等。

参考文献:

[1] 孙长江,王磊,吴俊秀. 大凌河流域水资源现状分析与可持续利用对策[J]. 南水北调与水利科技,2007,5(2):46-49. (SUN Changjiang, WANG Lei, WU Jinxiu. The analysis on water resources actuality and countermeasures of sustainable utilization in Daling River Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2007,5(2):46-49. (in Chinese))

[2] 王国庆,张建云,贺瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J]. 水科学进展,2006,17(6):853-858. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, HE Ruimin. Impacts of environmental change on runoff in Fenhe River Basin of the middle Yellow River[J]. Advances in Water Science,2006,17(6):853-858. (in Chinese))

[3] 张丹,周惠成. 大凌河流域上游水资源变化趋势及成因研究[J]. 水文,2011,31(4):81-87. (ZHANG Dan, ZHOU Huicheng. Change of runoff and its major driving factors in the upper reaches of Dalinghe River Basin[J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31 (4) : 81-87. (in Chinese))

[4] 魏晶,王涌翔,吴钢,等. 辽西大凌河流域土地利用变化及驱动力分析[J]. 生态环境,2006,15(3):559-563. (WEI Jing, WANG Yongxiang, WU Gang, et al. Driving forces analysis of land utilization in Dalinghe River Watershed of western Liaoning Province during 1987-2002 [J]. Ecology and Environment, 2006, 15 (3) : 559-563. (in Chinese))

[5] 单丽. 大凌河流域水环境承载力研究[D]. 南京: 河海大学,2006.

[6] FU Guobin, CHEN Shulin, LIU Changming, et al. Hydro-climatic trends of the Yellow River Basin for the last 50 years[J]. Climate Change,2004,65(1),149-178.

[7] PETTITT A N. A nonparametric approach to the change point problem[J]. Applied Statistics, 1979, 28 (2) : 126-

135.

[8] MANN H B. Non-parametric tests against trend [J]. Econometric Society,1945,13(3):245-259.

[9] KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. London: Charles Griffin,1975.

[10] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau [J]. Journal of the American Statistical Association,1968,63(4):1379-1389.

[11] HIRSCH R M, SLACK J R, SMITH R A. Nonparametric tests for trend in water quality [J]. Water Resources Research,1982,20(2):107-121.

[12] YUE Sheng, PILON P, PHINNEY B. Canadian streamflow trend detection: impacts of serial and cross-correlation [J]. Hydrological Sciences Journal,2003,48(1):51-64.

[13] YUE Sheng, PILON P, PHINNEY B, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series [J]. Hydrological Processes, 2002, 16 (9) : 1807-1829.

[14] ZHANG Lu, HICKEL K, DAWES W R, et al. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration[J]. Water Resources Research,2004,40(2):1-14.

[15] VIVEK K A. The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff[J]. Journal of Hydrology, 2002,265(1):164-177.

[16] MILLY P C, DUNNE K A. Macroscale water fluxes 2: water and energy supply control of their inter-annual variability[J]. Water Resource Research,2002,38(10):241-249.

[17] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment, Part I: model development [J]. Journal of American Water Resources Association,1998,34(1):73-89.

[18] FU Guobin, BARBER M E, CHEN Shulin. The impacts of climate change on regional hydrological regimes in the Spokane River Watershed [J]. Journal of Hydrologic Engineering,2007,12(5):452-461.

[19] FU Guobin, CHARLES S P, CHIEW F H S. A two-parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow [J]. Water Resources Research,2007,43(11):2578-2584.

[20] MORIASI D N, ARNOLD J G, van LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE,2007,50(3):885-900.

[21] BOSCH J M, HEWLETT J D. A review of catchment experiments to determine the effects of vegetation changes on water yield and evapotranspiration [J]. Journal of Hydrology,1982,55(14):3-23.

[22] 李慧赞. 植被变化与气候变化的径流响应研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.

(收稿日期:2014-11-24 编辑:郑孝宇)