

滦河流域气候变化与人类活动对径流的影响

师忱¹, 袁士保², 史常青¹, 赵廷宁¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京市园林绿化局, 北京 100013)

摘要: 以滦河流域为研究区域, 应用敏感性分析和双累积曲线法分析气候变化和人类活动对研究区径流变化的影响。结果表明: 研究区流域径流存在明显的下降趋势, 与基准期(1956—1979年)相比, 变化期(1980—2013年)径流量减少了52.59 mm(50.43%); 滦河流域径流对降水的敏感性系数 $\partial Q/\partial P$ 为0.336 1, 对潜在蒸散发的敏感性系数 $\partial Q/\partial E_0$ 为-0.123 5, 气候变化影响量为22.23 mm; 滦河流域径流变化过程中, 人类活动影响量为32.07 mm, 其贡献率为57.26%, 远大于气候变化的影响39.69%, 人类活动的影响是导致滦河流域径流减少的主要因素。

关键词: 气候变化; 人类活动; 径流; 滦河流域

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0264-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.02.039

Effects of Climate Change and Human Activities on Runoff in Luanhe Basin

SHI Chen¹, YUAN Shibao², SHI Changqing¹, ZHAO Tingning¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2. Beijing Municipal Bureau of Landscape and Forestry, Beijing 100013)

Abstract: In this study, Luanhe basin was chose as the study area, and sensitivity analysis and double mass curve were used to analyze the effects of climate change and human activity on runoff. The results showed that the runoff in Luanhe basin decreased obviously, and the runoff in the change period (1980—2013) decreased 52.59 mm (50.43%) compared with the reference period (1956—1979); the sensitivity coefficients of runoff to precipitation and potential evapotranspiration were 0.336 1 and -0.123 5, respectively; in this change, the impact of climate change was 22.23 mm, while the impact of human activities was 32.07 mm and accounted for 57.26%, which was far greater than the climate change (39.69%). The human activities were the main impact factors causing the decrease of runoff in the Luanhe River basin.

Keywords: climate change; human activities; streamflow; Luanhe basin

气候变化是当今人类生存和发展面临的严峻挑战, 是国际社会普遍关注的重大全球性问题, 积极应对气候变化, 已经成为国际共识和发展趋势^[1-2]。水资源是受气候变化影响最直接和最重要的领域^[3], 而变化环境下的水文循环研究已成为当今水科学研究的热点之一^[4-5]。近50年来中国河川径流量减少现象已引起政府决策部门和公众的广泛关注, 在全球气候变化背景下, 研究流域径流变化过程及影响因素, 对流域水资源规划及管理具有重要的现实意义。

近些年来, 各国学者在河川径流归因分析和气候变化影响评价等方面进行了大量研究^[6-10]。但由于研究方法以及数据资料的限制等因素, 以往的研究多侧重于模型应用, 需要耗费大量的精力在模型的参数

校准等方面。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, 它能够将各气候因子与径流变化紧密联系起来^[11], 为探索不同气象因子对流域径流的影响提供了更简便的途径。

流域径流不仅受气候变化的影响, 也受地貌、土壤、植被等自然条件以及人类活动的影响。近几十年来, 各流域土地利用方式发生了重大变化, 而新增加的水利工程的数量也十分密集, 滦河流域上现有大型水库4座, 即庙宫、潘家口、大黑汀、桃林口水库, 已控制流域面积的89%, 这些对流域径流均产生了巨大的影响。以往对人类活动影响的分析多基于分布式水文模型模拟, 而水文模型由于参数众多, 需要耗费大量精力对各参数进行率定^[12]。因此, 基于多元统计的时间序列分析方

法成为另一种较为简便准确的方法。

滦河流域是我国经济快速发展的地区,有承德、唐山、秦皇岛等经济中心,同时还担负着向天津、唐山及滦下灌区供水的责任,但近年来流域径流量大幅减少,并多次造成供水危机。本研究以滦河流域为研究区域,分别应用敏感性分析及双累积曲线研究气候变化与人类活动对流域径流变化的影响,明确各自的影响量和贡献率,旨在为滦河流域水资源管理提供参考。

1 研究区概况

滦河流域是海河流域的子流域之一,位于华北平原东北部($39^{\circ}44'—42^{\circ}44'N, 115^{\circ}33'—119^{\circ}36'E$),流域面积 $44\,750\text{ km}^2$, 占海河流域总面积的 14.06% 。流域地形地貌多为地山丘陵,高程范围 $24\sim 2\,150\text{ m}$ 。主要支流有伊逊河、武烈河、瀑河、青龙河等。流域地处温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨。流域平均气温 $7.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 多年平均降水量 $500\sim 600\text{ mm}$ 。研究区主要土地利用类型为林地与草地,森林类型主要为针阔混交林与落叶阔叶林,主要的土壤类型为褐土和棕壤,土层一般较薄,深度多不足 1 m 。

2 研究方法

2.1 潜在蒸散发计算方法

本研究中潜在蒸散发应用 Penman-Monteith 公式计算而来^[13],其表达式为:

$$E_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C}{T+273}\mu_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\mu_2)} \quad (1)$$

$$\Delta = 2503 \frac{e^{\frac{17.27T}{T+273.3}}}{(T+237.3)^2} \quad (2)$$

式中: E_0 为日潜在蒸散发量(mm); Δ 为饱和水汽压与平均气温的函数斜率($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); R_n 为总辐射(MJ/m^2); G 为土壤热通量(MJ/m^2); γ 为干湿表常数($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); μ_2 为 2 m 高处的风速(m/s); C 为单位转换系数,为 900 。

2.2 Mann-kendall 突变检验

通过构造一秩序列, Mann-Kendall 统计检验方法也可以用来对数据序列进行突变点检验^[14]。

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

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad 1 \leq j \leq i \quad (4)$$

采用统计变量 UF_k , 将其定义为:

$$UF = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad k=1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

式中:

$$E(S_k) = \frac{k(k+1)}{4} \quad (6)$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (7)$$

将数据序列 x 进行逆序排列,再按公式进行计算,同时满足:

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

基于两个序列 UF_k 和 UB_k 值数据,在坐标系中绘制折线图。如果两条曲线在显著性临界值之间出现交叉点,则交叉点所对应的时间点即为突变点。

2.3 气候变化影响量计算

Budyko^[15]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,可简单表达为:

$$\frac{E}{P} = f(E_0/P) \quad (9)$$

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(mm)。我国气候学家傅抱璞^[16]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:

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - \left[1 + \left(\frac{E_0}{P} \right)^{\omega} \right]^{1/\omega} \quad (10)$$

式中: ω 为一无量纲的参数。

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

$$Q = [P + E_0^{\omega}]^{1/\omega} - E_0 \quad (11)$$

基于公式(3),应用微积分求偏导,可得流域径流(Q)对气候变化要素(X)的敏感性($\partial Q/\partial X$):

$$\frac{\partial Q}{\partial P} = \left[1 + \left(\frac{E_0}{P} \right)^{\omega} \right]^{(1/\omega-1)} \quad (12)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial E_0} = \left[1 + \left(\frac{P}{E_0} \right)^{\omega} \right]^{(1/\omega-1)} - 1 \quad (13)$$

式中: ω 应用最小二乘法求解而得。

Milly and Dunne 基于 Budyko 假设理论,提出了计算气候变化引起的径流变化量的方法:

$$\Delta Q_{\text{climate}} = \Delta Q_P + \Delta Q_{E_0} = \beta \Delta P + \gamma \Delta E_0 \quad (14)$$

式中: β 和 γ 分别为单位降水和潜在蒸散发变化对流域径流的影响量,即敏感性系数, $\beta = \partial Q/\partial P$, $\gamma = \partial Q/\partial E_0$ 。

2.4 双累积曲线

本研究采用双累积曲线的方法来计算人类活动对流域径流的影响。其基本的步骤为:将 X 为基准变量, Y 为被检验变量, N 为观测年数,对 X 及 Y 按年序各自累计,得到新的逐年累计序列,即:

$$X'_i = \sum_{i=1}^N X_i \quad (15)$$

$$Y'_i = \sum_{i=1}^N Y_i \quad (16)$$

降水在有限的时段内其变化是自然变化的,由于人类活动影响降水很少,而径流则是受降水和人类活动的双重影响。因此,在本研究中,将累积降水量作为基准变量,通过该方法可以分辨出人类活动的影响。

其具体操作方法为:

(1)基于累积降水量 ΣP 和累积径流量 ΣQ 的关系曲线,判断人类活动对径流发生影响的时间点,以该时间点为界划分基准期和变化期 2 个时段。

(2)对基准期逐年 ΣP 和 ΣQ 两列数据进行线性回归,拟合两者之间的关系方程:

$$\Sigma Q=a\Sigma P+b \tag{17}$$

(3)应用上述拟合方程,将变化期的 ΣP 代入公式中求得变化期的累积径流深模拟值 $\Sigma Q'$, $\Sigma Q'$ 即认为是与基准期下垫面条件相同的没有人类活动影响下的径流。

(4)基于累积值的叠加原理,反向应用该原理计算方法,基于模拟值 $\Sigma Q'$ 反推得到逐年的径流深模拟值 Q' ,则变化期径流量的实测值与平均值的差即为人类活动对流域径流的影响。

2.5 数据来源

本研究所需流域水文过程数据主要来源于中国水文年鉴海河流域卷及逐年海河流域水资源公报(2000—2013 年),各水文站位置见图 1。数据时间序列为 1956—2013 年。气象相关数据均来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),各气象站位置见图 1 所示,数据内容包括降水量、蒸发量、相对湿度、气温、气压、日照时数、地面辐射、风向风速等。DEM 数据主要提取于中国 90 m 分辨率数字高程模型数据集。

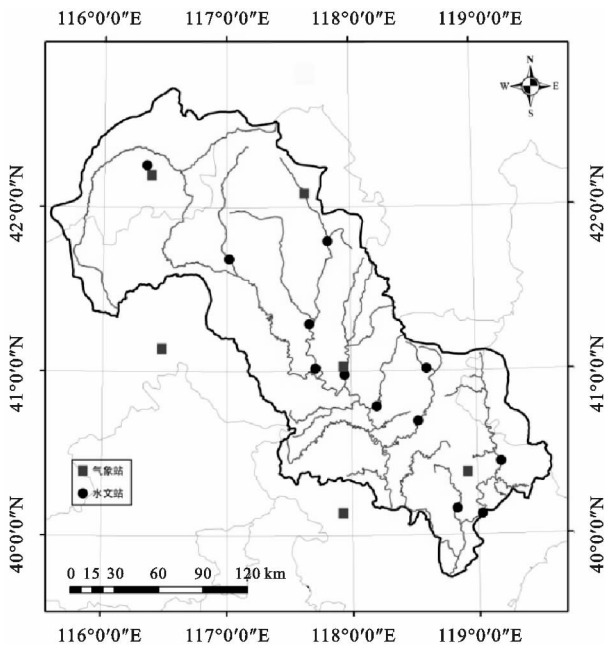


图 1 滦河流域及气象站、水文站位置

3 结果与分析

3.1 滦河流域径流变化特征

应用 Mann-Kendall 趋势分析,滦河流域 1956—2013 年间逐年径流量的统计量 Z 为 -3.28 ,表明研究区径流量为下降趋势,而 $|Z|>2.58$,表明研究区径流不仅为下降趋势,而且下降趋势在 0.01 水平上显著。同时,应用 Mann-Kendall 突变检验对滦河流域逐年径流量的突变情况进行检验,结果见图 2。

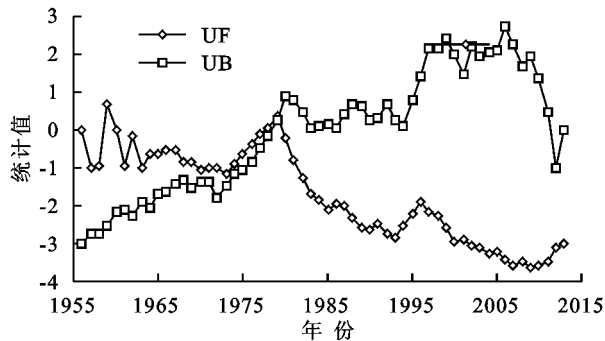


图 2 滦河流域年径流量 Mann-Kendall 突变检验

从图 2 可以看出,研究区的年径流量 Mann-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 $Y=-1.96$),表明径流变化趋势明显。UF 线均处于 0 线以下,说明在研究时段 1956—2013 年间,年径流量呈明显逐年减少的趋势;另一方面,检验结果中 UF 曲线和 UB 曲线在 1979 年出现交叉点,且交点位于两临界线之间,说明研究区径流变化过程中在 1979 年发生突变。

基于逐年径流的突变点 1979 年,可以将研究时段划分为基准期(1956—1979 年)和变化期(1980—2013 年)。图 3 显示了 2 个时段内滦河流域分别的多年平均径流量对比,基准期多年平均径流量为 104.16 mm,变化期多年平均径流量为 51.57 mm,表明与基准期相比,变化期径流量减少了 52.59 mm(50.43%)。

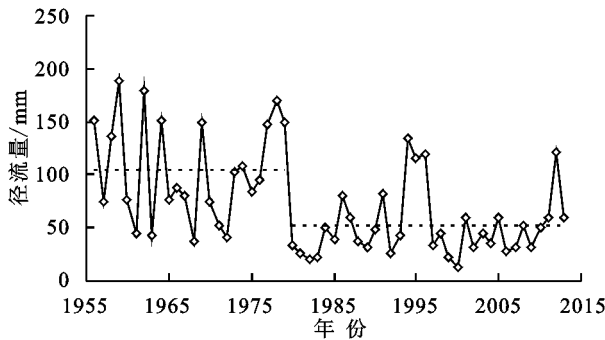


图 3 滦河流域基准期(1956—1979 年)与变化期(1980—2013 年)径流量对比

3.2 气候变化对滦河流域径流的影响

3.2.1 流域径流对气候要素的敏感性系数 本研究基于滦河流域年平均降水量(577.31 mm)、年平均径流量(73.33 mm)和年平均潜在蒸散发量(977.87

mm), 将各数据带入公式(11), 基于最小二乘法, 求得研究区域内 ω 参数结果为 2.821 8。将 ω 值带入公式(12)和公式(13)求得滦河流域径流对降水的敏感性系数 $\partial Q/\partial P$ 为 0.336 1, 对潜在蒸散发的敏感性系数 $\partial Q/\partial E_0$ 为 -0.123 5。这表明滦河流域径流对气候变化的敏感性为降水每增加 1 mm, 流域径流将增加 0.336 1 mm; 潜在蒸散发量每增加 1 mm, 流域径流将减少 0.123 5 mm。

3.2.2 气候变化对滦河流域径流变化的影响量 图 4 与图 5 显示了不同研究时段内滦河流域降水和潜在蒸散发的变化对比, 分析结果表明, 在研究时段(1956—2013 年)内, 滦河流域降水量为下降趋势, 基准期(1956—1979 年)年平均降水量为 599.70 mm, 变化期(1980—2013 年)年平均降水量为 535.03 mm。由此可知, 降水量的变化量 ΔP 为减少 64.66 mm; 而研究区潜在蒸散发量的变化趋势表明, 在整个研究时段内, 研究区潜在蒸散发量变化不大, 基准期(1956—1979 年)年平均潜在蒸散发量为 980.27 mm, 变化期(1980—2013 年)年平均潜在蒸散发量为 976.19 mm, 潜在蒸散发变化量 ΔE_0 为减少 4.08 mm。

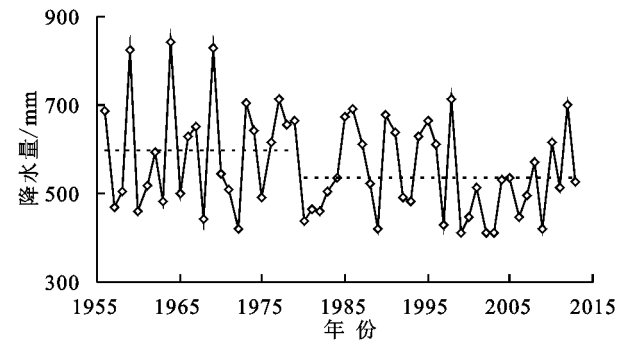


图 4 滦河流域基准期(1956—1979 年)与变化期(1980—2013 年)降水量对比

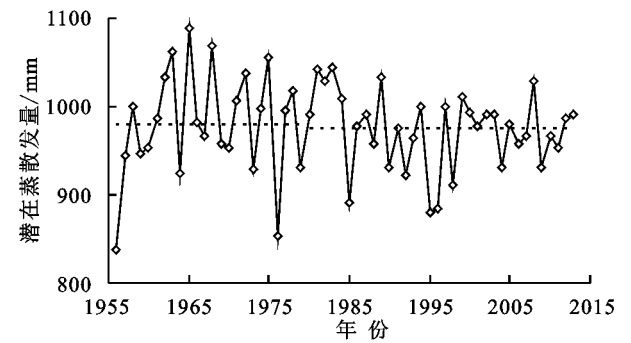


图 5 滦河流域基准期(1956—1979 年)与变化期(1980—2013 年)潜在蒸散发量对比

基于滦河流域径流对气候变化的敏感性分析, 滦河流域径流对降水的敏感性系数 β 为 0.336 1, 对潜在蒸散发的敏感性系数 γ 为 -0.123 5。而基于基准期与变化期降水与潜在蒸散发量变化量分析, 降水变化量 ΔP 为 -64.66 mm, 潜在蒸散发变化量 ΔE_0 为 -4.08 mm。基于公式(14), 滦河流域气候变化对流

域径流的影响为 22.23 mm, 其中降水的影响量为 21.73 mm, 潜在蒸散发的影响量为 0.50 mm。

3.3 人类活动对滦河流域径流的影响

基于滦河流域 1956—2013 年逐年降水量与径流量, 对 2 个数据序列进行逐年累积, 得到研究区双累积曲线图(图 6)。

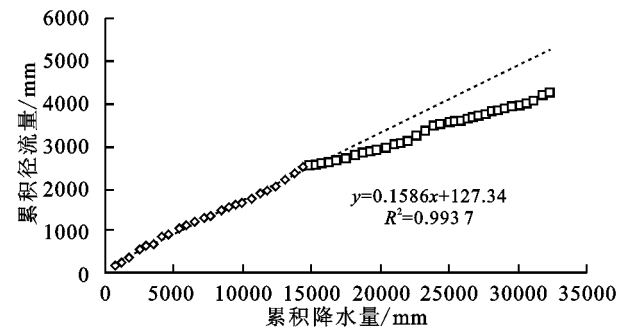


图 6 滦河流域降水—径流双累积曲线

从图 6 可以看出, 累积降水量与累积径流量之间的相关关系以 1979 年为界分为明显的 2 个阶段, 其拟合直线的斜率在 1979 年发生明显的变化, 这表明人类活动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人类活动干扰的程度。基准期累积降水量 ΣP 与累积径流量 ΣQ 之间的拟合直线回归方程为 $\Sigma Q = 0.1586 \Sigma P + 127.34$, 方程决定系数 R^2 为 0.993 7, 观测年数 N 为 58 年, 统计检验达到了 0.001 置信水平。

将变化期的累积降水量带入拟合方程中, 得到模拟累积径流量, 并反推变化期模拟逐年径流量 Q' , 结果表明, 变化期(1980—2013 年)实测年平均径流量为 51.57 mm, 模拟年平均径流量为 83.64 mm, 由此可知, 人类活动导致的径流变化量 ΔQ_{human} 为 32.07 mm。

3.4 贡献率分析

在上述研究中, ΔQ_{human} 减少 32.07 mm, $\Delta Q_{\text{climate}}$ 减少 22.23 mm, 因此 $\Delta Q_{\text{climate}} + \Delta Q_{\text{human}}$ 减少 54.30 mm, 而实际 ΔQ 减少 52.59 mm, 这说明上述方法计算结果的误差值为 1.71 mm, 误差率仅为 3.32%, 误差较小。因此, 上述对气候变化与人类活动对流域径流变化的影响量的计算是准确的。对两部分的影响量及贡献率的结果分析见表 1。结果表明, 滦河流域径流变化过程中, 人类活动影响的贡献率为 57.26%, 远远大于气候变化的影响 39.69%, 这说明人类活动的影响是导致滦河流域径流减少的主要因素。

表 1 研究区径流变化中气候变化与人类活动的贡献率

项目	ΔQ	$\Delta Q_{\text{climate}}$	ΔQ_{human}	误差
影响量/mm	52.59	22.23	32.07	1.71
贡献率/%	100.00	39.69	57.26	3.05

4 讨论

近些年来, 各国学者在河川径流归因分析和气候

变化影响评价等方面进行了大量研究^[17-18]。但由于研究方法以及数据资料的限制等因素,以往的研究多侧重于气候变化整体的影响量或贡献率的计算,而对气候变化中各响应因子的影响的分析还不够充分^[18]。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,它能够将各气候因子与径流变化紧密联系起来^[19]。本研究基于敏感性分析方法,不仅对气候变化整体的影响量进行分析,也对气候变化中两个主要的影响因子(降水和潜在蒸散发量)的贡献率进行了分析。

人类活动通过改变下垫面类型从而影响区域水循环过程,其对流域径流的影响有众多因素,如土地利用变化、水利工程、水资源开发等均有明显的影响,而海河流域是受人类活动影响最为严重的区域之一。而大多数研究均表明,人类活动对流域径流的影响要远大于气候变化的影响,其贡献率大多在 50% 以上。Wang 等^[20]的研究结果表明,在滦河流域径流减少过程中,人类活动的贡献率可达 57%~67%,而气候变化的贡献率仅为 33%~43%。本研究中也得到了相似的结论,人类活动的贡献率为 57.26%,而气候变化的贡献率仅为 39.69%。

目前大多数气候敏感性研究旨在了解降水以及其他气象因子(潜在蒸散发、气温、风速等)的变化对流域径流的影响,而许多研究过程中均发现了流域径流对气候变化的敏感性在空间尺度上存在分布差异^[21]。例如,中国不同气候区的研究表明,黄河以北干旱半干旱地区的流域径流对气候变化最敏感,其次为华中、华南半湿润区和湿润区,而西部高寒山区流域径流对气候变化的响应最弱^[22];黄淮海平原区流域径流对气候变化的敏感性从南到北依次递减^[23];在美国 MOPEX 流域的研究表明,美国东部与西部流域径流对降水的敏感性有明显的差异性^[24]。这些研究都表明流域径流对气候变化的敏感性存在空间差异性,但对这种空间分布差异的产生原因尚没有明确的认识,在今后的研究中将进一步进行相关的分析和研究。

土地利用变化是人类活动对流域径流的影响中十分重要的部分,以往已有研究对其进行研究,如史晓亮等^[25]的研究结果表明,与 1985 年相比,2000 年土地利用现状下径流增加了 5.1%。本研究中基于双累积曲线方法来分析人类活动的影响,仅对其整体影响量进行了分析;另一方面,基于流域逐年径流突变分析将研究时段划分为基准期与变化期 2 个时段,而有研究^[26]表明,研究时段有时可以划分为多个变化期。在今后的研究中,将偏重上述方面的分析,进

一步完善相关研究结果。

5 结论

本研究以滦河流域为研究区域,分别对研究区径流年际变化过程中气候变化和人类活动的影响进行分析,主要研究结论为:

(1)研究区逐年径流量均存在明显的下降趋势,在 1979 年发生突变。与基准期(1956—1979 年)相比,变化期(1980—2013 年)径流量减少了 52.59 mm(50.43%)。

(2)滦河流域径流对降水的敏感性系数 $\partial Q/\partial P$ 为 0.336 1,对潜在蒸散发的敏感性系数 $\partial Q/\partial E_0$ 为 -0.123 5,气候变化对滦河流域径流的影响量为 22.23 mm。

(3)滦河流域径流变化过程中,人类活动的影响量为 32.07 mm,其贡献率为 57.26%,远大于气候变化的影响 39.69%,人类活动的影响是导致滦河流域径流减少的主要因素。

参考文献:

- [1] Creed I F, Spargo A T, Jones J A, et al. Changing forest water yields in response to climate warming: Results from long-term experimental watershed sites across North America[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(10):3191-3208.
- [2] 秦大河. 中国气候与环境演变[M]. 北京:科学出版社, 2012.
- [3] 张建云,王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京:科学出版社, 2007.
- [4] 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.
- [5] 徐宗学,刘浏,刘兆飞. 气候变化影响下的流域水循环[M]. 北京:科学出版社, 2015.
- [6] 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(6):331.
- [7] 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(3):326-338.
- [8] Markovich K H, Maxwell R M, Fogg G E. Hydrogeological response to climate change in alpine hillslopes [J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(18):3126-3138.
- [9] 严登华,袁喆,王浩,等. 水文学确定性和不确定性方法及其集合研究进展[J]. *水利学报*, 2013, 44(1):73-81.
- [10] 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[J]. *水科学进展*, 2007, 18(2):230-234.
- [11] Andréassian V, Coron L, Lerat J, et al. Climate elas-

- ticity of streamflow revisited: An elasticity index based on long-term hydrometeorological records[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2016, 12(4):3645-3679.
- [12] 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.
- [13] Yang Y, Cui Y, Luo Y, et al. Short-term forecasting of daily reference evapotranspiration using the Penman-Monteith model and public weather forecasts[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 177:329-339.
- [14] 胡刚. 基于 Mann—Kendall 的济南市气温变化趋势及突变分析[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2012, 26(1):99-104.
- [15] Budyko M I. *Climate and life* [M]. Salt Lake City: American Academic Press, 1974.
- [16] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. *大气科学*, 1981, 5(1):25-33.
- [17] 夏军. 气候变化对水资源的影响模拟[M]. 北京:科学出版社, 2016.
- [18] 张建云, 王国庆. 河川径流变化及归因定量识别[M]. 北京:科学出版社, 2014.
- [19] Konapala G, Mishra A K. Three-parameter-based stream-flow elasticity model: Application to MOPEX basins in the USA at annual and seasonal scales[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2016, 20(6):1-28.
- [20] Wang W, Shao Q, Yang T, et al. Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff changes: A case study in four catchments of the Haihe River basin, China[J]. *Hydrology Process*, 2013, 27(8):1158-1174.
- [21] Yang H, Qi J, Xu X, et al. The regional variation in climate elasticity and climate contribution to runoff across China [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 517(1):607-616.
- [22] 王国庆, 张建云, 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.
- [23] Dan L, Ji J, Xie Z, et al. Hydrological projections of climate change scenarios over the 3H region of China: A VIC model assessment [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, 117(D11):11102.
- [24] Konapala G, Mishra A K. Three-parameter-based stream-flow elasticity model: Application to MOPEX basins in the USA at annual and seasonal scales[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2016, 20(6):1-28.
- [25] 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[J]. *水科学进展*, 2014, 25(1):21-27.
- [26] 张利平, 李凌程, 夏军, 等. 气候波动和人类活动对滦河流域径流变化的定量影响分析[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(4):664-672.
- (上接第 263 页)
- [25] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(11):1361-1368.
- [26] 张文英, 张庆江. 小麦—夏玉米两熟制土壤—作物系统的氮素平衡[J]. *华北农学报*, 1994, 9(增刊):109-114.
- [27] 刘学军, 巨晓棠, 潘家荣, 等. 冬小麦—夏玉米轮作中的氮素平衡与损失途径[J]. *土壤学报*, 2002, 39(增刊):228-237.
- [28] 王秀斌, 周卫, 梁国庆, 等. 优化施肥条件下华北冬小麦/夏玉米轮作体系的土壤氮挥发[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(2):344-351.
- [29] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(12):1493-1499.
- [30] 刘新宇. 华北平原冬小麦—夏玉米轮作体系化肥氮后效及去向量化研究[D]. 河北保定:河北农业大学, 2010.
- [31] 石维, 同延安, 赵营, 等. 灌溉施肥对冬小麦土壤氮素盈亏的影响[J]. *麦类作物学报*, 2006, 26(2):93-97.
- [32] 王启现, 王璞, 申丽霞, 等. 施氮时期对玉米土壤硝态氮含量变化及氮盈亏的影响[J]. *生态学报*, 2004, 24(8):1582-1588.
- [33] 石玉, 于振文, 王东, 等. 施氮量和底追比例对小麦氮素吸收转运及产量的影响[J]. *作物学报*, 2006, 32(12):1860-1866.
- [34] 马冬云, 郭天财, 岳艳军, 等. 不同时期追氮对冬小麦植株氮素积累及转运特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(2):262-268.
- [35] 赵广才, 李春喜, 张保明, 等. 不同施氮比例和时期对冬小麦氮素利用的影响[J]. *华北农学报*, 2000, 15(3):99-102.