



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.01.001

夏军, 马协一, 邹磊, 等. 气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 01-06. XIA Jun, MA Xie yi, ZOU Lei, et al. Quantitative analysis of the effects of climate change and human activities on runoff in the Upper Hanjiang River basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 01-06. (in Chinese)

气候变化和人类活动对 汉江上游径流变化影响的定量研究

夏军, 马协一, 邹磊, 王咏铃, 景朝霞

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 以汉江上游为例, 基于弹性系数法和水文模拟法定量估算气候变化和人类活动对流域径流的影响, 探讨了变化环境下流域径流对气候变化和人类活动的响应特征。研究结果表明: 1961年-2013年汉江上游流域径流呈明显下降趋势, 并在1985年前后发生了突变; 降水及潜在蒸散发在同时期内也逐渐降低, 但变化趋势不显著。气候变化对径流变化的贡献率为42.8%~43.5%, 人类活动对径流变化的贡献率为56.5%~57.2%, 相比人类活动对汉江上游径流的影响稍大, 且其对径流变化的影响呈现增长的趋势。

关键词: 气候变化; 人类活动; 定量研究; 水文模型; 弹性系数; 汉江上游流域

中图分类号: P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)01-0001-06

Quantitative analysis of the effects of climate change and human activities on runoff in the Upper Hanjiang River basin

XIA Jun, MA Xie yi, ZOU Lei, WANG Yong ling, JING Zhao xia

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: With the purpose of exploring the features of hydrological responses to climate change and human activities, a quantitative assessment of the relative contributions from climate variability and human activities to runoff changes in the Upper Hanjiang River basin was conducted using two methods, namely the elasticity method and the hydrological modeling method. The results showed that annual runoff underwent a significant decreasing trend over the period of 1961-2013, and a breaking point was detected in 1985. Precipitation and potential evapotranspiration both decreased gradually over the same period, but the trends were not significant. Climate variability accounted for 42.8%~43.5% of the decrease in runoff, and the impact of human activities accounted for 56.5%~57.2%, showing a more important influence on runoff changes. Moreover, the latter's influence was in an increasing trend.

Key words: climate change; human activities; quantitative assessment; hydrological modeling; climate elasticity; Upper Hanjiang River basin

变化环境下的流域水文循环是一个复杂的过程, 其受多种因素制约, 其中气候变化和人类活动是

收稿日期: 2016-10-26 修回日期: 2016-12-01 网络出版时间: 2017-01-03
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170103.2036.001.html>
基金项目: 国家自然科学基金(41571028)

Fund: National Natural Science Foundation of China (41571028)

作者简介: 夏军(1954), 男, 湖北广水人, 教授, 中国科学院院士, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源科学研究。E-mail: xiaj@igsrr.ac.cn

通讯作者: 马协一(1994), 女(满族), 河南南阳人, 主要从事变化环境下流域水循环研究。E-mail: maxy@whu.edu.cn

两个重要的驱动和组成部分^[1]。降水作为径流形成与转化的必要条件,以及人类活动对下垫面的影响都会导致流域天然水循环过程发生变化,改变流域原始的降雨径流关系。因此,气候变化和人类活动对流域水文过程的影响逐渐成为水科学研究中的热点问题之一^[2]。而气候变化和人类活动产生的影响往往是综合的,如何对这种综合影响进行科学的分解是研究中的一个核心问题。目前,在定量区分气候变化和人类活动的水文响应研究中,广泛采用的方法主要有基于 Budyko 理论^[3]的弹性系数法以及基于物理过程的水文模拟法。弹性系数法对历史数据的要求较低,但往往只能提供气候变化和人类活动影响在年尺度上的区分量^[4]。如 Xu 等^[5]采用基于 Budyko 理论的弹性系数法对海河流域径流减少的主要原因进行了归因分析,结果表明人类活动是造成径流减少的主要原因(贡献率 73.1%),且人类活动的影响主要来源于植被增加;Xia 等^[6]对永定河流域的研究结果显示,人类活动对流域径流减少的贡献率为 87.4%~89.5%。水文模拟法具有良好的物理基础,并且能够应用于月或日等高分辨率的时间尺度上,但水文模型的参数及结构存在一定的不确定性^[7],选取合适的水文模型非常关键。如 Zhang 等^[8]采用 AWBM 模型对鄱阳湖流域的研究表明,气候变化和人类活动对于鄱阳湖径流减少的贡献率分别为 26.8% 和 73.2%;Zeng 等^[9]采用 SIMHYD 模型对漳河流域的研究结果显示气候变化的影响要大于人类活动对年径流变化的影响。由此可以看出两种方法各有优势,且都有其不足之处,为了准确评估流域气候变化和人类活动对径流的影响,保证研究结果的准确性,同时采用两种方法进行交叉验证是十分必要的。

丹江口水库是南水北调中线工程的水源地,有“亚洲天池”之美誉,是汉江的天然水位调节器。自 20 世纪 90 年代以来,汉江上游频繁遭遇干旱,河川径流量明显减少。基于此,针对汉江上游丹江口水库入库径流变化的研究显得尤为重要,能够为合理分配汉江上游水资源以及南水北调中线工程的运行提供更为科学的指导。本文以汉江上游丹江口以上流域为研究区,首先对流域降雨、蒸散发以及径流等水文要素的变化规律进行识别,然后采用基于 Budyko 理论的弹性系数法和基于分布式时变增益水文模型(DTVGM)的水文模拟法定量估算气候变化和人类活动对汉江上游径流变化的影响贡献率。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域概况

汉江上游流域(图 1)位于东经 106° - 112.0°,北纬 31.4° - 34.3°,全长 956 km,流域面积为 95 200 km²,约占汉江全流域的 60%。该流域属于亚热带季风区,半湿润气候,四季分明。本文研究期间(1961 年-2013 年)的多年平均气温为 14℃,多年平均降水量为 849.5 mm,40%~60%的降水集中在 7 月-9 月。丹江口水库的年平均入库流量约为 1 152 m³/s。

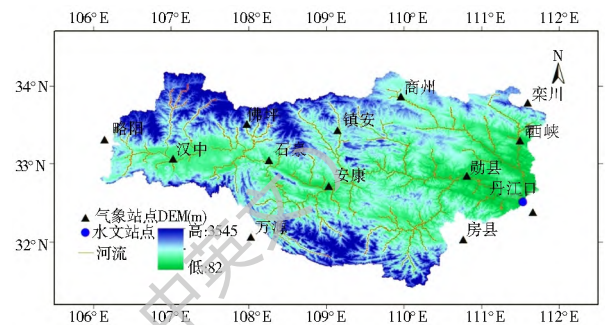


图 1 汉江上游流域示意图

Fig. 1 The overview of the Upper Hanjiang River basin

1.2 数据资料

研究选取汉江上游 13 个气象站 1961 年-2013 年的逐日气象要素资料,站点分布均匀,能大致反映流域水文气象的空间变化,数据来源于中国气象科学数据共享服务网。流域的面平均雨量通过泰森多边形法进行估算。径流数据为丹江口水库同时期的入库月径流数据,由丹江口水利枢纽管理局提供。由于缺乏长序列的蒸散发实际观测资料,各气象站点的潜在蒸散发由 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式^[10]计算得到,然后通过反距离加权插值法(IDW)得到流域形心处的参考蒸散发,并以此求出流域面平均潜在蒸散发。分布式时变增益水文模型采用的土地利用和土壤类型数据来自中科院资源环境科学数据中心。所有站点的分布情况见图 1。

2 研究方法

2.1 水文要素趋势分析及突变检验方法

本文采用 Mann-Kendall 非参数统计检验方法^{[11][12]}来分析年降雨、年径流及年潜在蒸散发序列的变化趋势和突变情况。研究者通常认为水文序列在受到气候变化或人类活动的显著影响后,其分布序列的平稳性会遭到干扰或破坏,呈现出一定程度的阶段性或趋势性变化^[13]。因此,根据检测出的径

流突变点可将研究期划分为基准期和突变期,其中基准期流域处于天然状态,径流演变仅受气候变化的影响,而突变期人类活动对流域产生显著影响,径流变化受到气候变化和人类活动的共同作用。

2.2 气候变化和人类活动对径流影响的定量区分方法

对于一个确定的流域,径流的变化受到气候变化和人类活动的共同影响,即

$$\Delta Q = \Delta Q_c + \Delta Q_H \quad (1)$$

式中: ΔQ 为径流变化总量; ΔQ_c 为气候变化引起的径流变化量; ΔQ_H 为人类活动引起的径流变化量。同时,径流变化总量可通过突变点前后两个时期的实测径流量之差计算得到,即

$$Q = \overline{Q_{obs,2}} - \overline{Q_{obs,1}} \quad (2)$$

式中: $\overline{Q_{obs,1}}$ 、 $\overline{Q_{obs,2}}$ 分别为基准期和突变期的实测径流量平均值。定量区分气候变化和人类活动对径流

的影响,只需量化出其中一个因子的作用,另一个因子的影响可通过式(1)计算得出。

2.2.1 弹性系数法

根据径流对降水及潜在蒸散发的敏感性系数,气候变化引起的径流量变化可表示为

$$\Delta Q_c = \varepsilon_P \frac{Q}{P} \Delta P + \varepsilon_{E_0} \frac{Q}{E_0} \Delta E_0 \quad (3)$$

式中: ε_P 和 ε_{E_0} 分别为径流对降水和潜在蒸散发的弹性系数; ΔP 和 ΔE_0 分别为降水和潜在蒸散发的变化。根据流域长时段水量平衡公式($Q = P - E_a$)以及 Budyko 假设^[3],流域实际蒸散发(E_a)为干燥指数($\phi = E_0/P$)的函数,弹性系数可根据下式计算:

$$\varepsilon_P = 1 + \frac{\phi F'(\phi)}{1 - F(\phi)}, \text{ 且 } \varepsilon_P + \varepsilon_{E_0} = 1 \quad (4)$$

其中, $F(\phi)$ 和 $F'(\phi)$ 可通过以下几种 Budyko 形式计算,见表1。

表1 6种常用的基于 Budyko 假设的 $F(\phi)$ 及 $F'(\phi)$ 表达式

Tab. 1 Six commonly used forms of $F(\phi)$ and $F'(\phi)$ based on the Budyko hypothesis

	$F(\phi)$	$F'(\phi)$
Schreiber ^[14]	$1 - e^{-\phi}$	$e^{-\phi}$
O'Ídek op ^[15]	$\phi \tanh(1/\phi)$	$\tanh(1/\phi) - 4/[\phi(e^{-1/\phi} + e^{1/\phi})^2]$
Budyko ^[16]	$[\phi \tanh(1/\phi)(1 - e^{-\phi})]^{0.5}$	$0.5[\phi \tanh(1/\phi)(1 - e^{-\phi})]^{-0.5} \times [(\tanh(1/\phi) - \text{sech}^2(1/\phi)/\phi)(1 - e^{-\phi}) + \phi \tanh(1/\phi)e^{-\phi}]$
Ture Pike ^[17]	$(1 + \phi^{-2})^{-0.5}$	$1/[\phi^3(1 + (1/\phi)^2)^{1.5}]$
Ful ^[18]	$1 + \phi - (1 + \phi^\alpha)^{1/\alpha}, \alpha = 2.5$	$1 - (1 + \phi^\alpha)^{1/\alpha - 1} \phi^{\alpha - 1}$
Zhang et al. ^[19]	$(1 + \omega\phi)/(1 + \omega\phi + 1/\phi), \omega = 1$	$(\omega + 2\omega\phi - 1 + 1/\phi^2)/(1 + \omega\phi + 1/\phi)^2$

2.2.2 水文模拟法

水文模拟法利用基准期的天然实测资料率定水文模型,然后保持参数不变,对突变期的径流进行模拟,则突变期的模拟径流可视为是不受人类活动影响的天然径流。因此人类活动对径流的影响可以表示为

$$Q_H = \overline{Q_{obs,2}} - \overline{Q_{sim,2}} \quad (5)$$

式中: $\overline{Q_{obs,2}}$ 和 $\overline{Q_{sim,2}}$ 分别为突变期的实测径流量和模拟径流量平均值。气候变化对径流的影响 ΔQ_c 可通过公式(1)计算得到。

本文采用分布式时变增益模型(DTVGM)进行径流模拟。DTVGM 是将夏军等^[20]提出的集总式 TVGM 水文非线性系统模拟通过 DEM/GIS 平台,推广到流域水文时空变化模拟的分布式水文模型^[21]。该模型能够建立土地利用/覆被变化与水文系统产流之间的影响关系,既有分布式水文概念性模拟的特征,又具有水文系统分析适应能力强的优点,在很多流域得到了应用和验证^[22-24]。模型评价统计指标采用 Nash 效率系数(NSE)及水量平衡误差(WBE)两个指标进行衡量,各指标计算公式如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum(Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (8)$$

$$WBE = \overline{Q_{sim}} \sqrt{\overline{Q_{obs}} - 1} \quad (9)$$

式中: $Q_{obs,i}$ 和 $Q_{sim,i}$ 分别为实测径流量和模拟径流量; $\overline{Q_{obs}}$ 和 $\overline{Q_{sim}}$ 分别为它们的平均值; i 为时间。

3 结果与讨论

3.1 水文序列趋势分析及突变检验

采用 Mann-Kendall 非参数统计检验法对汉江上游丹江口流域面平均年降水、年潜在蒸散发及年径流序列进行趋势分析和突变检验。结果如表2所示,年降水及年潜在蒸散发序列均呈现一定的下降趋势但并不显著,而年径流序列呈显著下降趋势($\alpha = 0.1$)。突变检验结果表明,年径流在1985年前后发生了突变(图2)。与突变前时期相比,突变后时期的流域年径流和年降水分别减少了21.5%、7.3%,年潜在蒸散发的变化非常微小,可忽略不计(表2)。由以上分析可以推测,径流的显著变化不

仅仅是由气候变化引起的, 人类活动可能也起到了重要的作用。

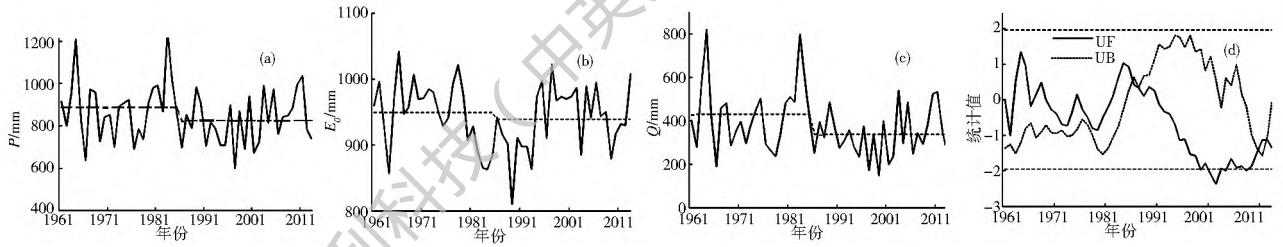


图 2 汉江上游年降水(P)、年潜在蒸散发(E_0)及年径流(Q)的变化趋势及突变点分析

(图(a)、(b)、(c)中虚线代表时段平均值,图(d)中虚线表示显著性水平为 0.05)

Fig. 2 Trends analysis and breaking point detection of annual precipitation (P), annual evapotranspiration (E_0) and annual runoff (Q) in the Upper Hanjiang River basin (Dot lines in Figs. (a), (b), (c) represent the average of the corresponding period; dashed horizontal lines in Fig. (d) represent the significance level of 0.05)

表 2 汉江上游水文气象序列突变前后变化分析

Tab. 2 Variations of hydroclimatic series before and after the inflection point in the Upper Hanjiang River basin

水文变量	MK 值	显著性	突变点前后均值/mm		变化率 (%)
			1961-1985	1985-2013	
P	-0.53	ns	887.3	822.1	-7.3
E_0	-0.74	ns	949.1	938.9	-1.1
Q	-1.36	*	428.4	336.2	-21.5

注: * 表示显著性水平为 0.1, ns 表示无显著趋势。

3.2 气候变化和人类活动对径流影响的定量区分

3.2.1 水文模拟法定量区分径流变化影响因素

依据 3.1 中的径流突变检验结果, 将研究期划分为两个时期: 1961 年-1985 年为基准期, 1986 年-2013 年为突变期。在基准期数据中, 采用 1961 年-1975 年数据率定模型参数, 1976 年-1985 年数据进行验证, 以评价模型在研究区的适应性。图 3 展示了模型率定期及验证期的月径流过程。率定期和验证期的 Nash 效率系数分别为 0.85 和 0.88, 水量平衡误差分别为 -0.02 和 0.04, 表明 DTVGM 模型的模拟效果较好, 适用于汉江上游流域径流模拟。基于率定好的模型对突变期(1986 年-2013 年)的径流进行模拟, 结果显示 Nash 效率系数仅为 0.66, 水量平衡误差为 29%, 说明突变期因受到非气象因子的影响, 降雨径流关系已发生了变化(表 3)。

根据实测径流量资料以及 DTVGM 模型对基准期和突变期径流的模拟结果, 采用水文模拟法定量区分各因素对突变期径流变化影响的分析结果见表 4。就 1986 年-2013 年的平均状况而言, 研究区年平均径流量由 1961 年-1985 年间的 428.4 mm 下降到 1986 年-2013 年间的 336.2 mm, 减少了 92.2 mm, 采用水文模型还原突变期的年平均径流量为 388.9 mm, 因此, 根据式(1)、式(2)、式(5), 计算可得由人类活动引起的径流减少量为 52.7 mm,

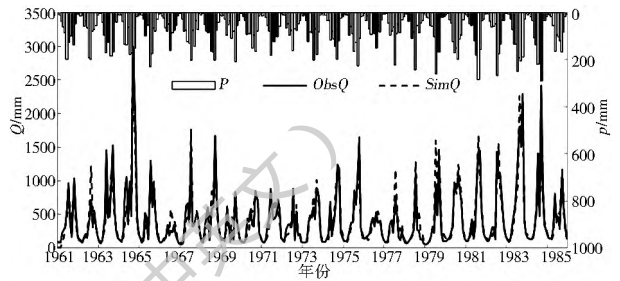


图 3 率定期(1961 年-1975 年)及验证期(1976 年-1985 年)的月降水径流过程线

Fig. 3 Simulation results of monthly runoff in the calibration period(1961-1975) and validation period(1976-1985)

表 3 各时期模型模拟效果的评价

Tab. 3 Model performance in each period

时期	NSE	WBE
基准期 (1961-1985)	0.85	-0.02
验证期(1976-1985)	0.88	0.04
突变期(1986-2013)	0.66	0.29

其贡献率为 57.2%, 气候变化引起了 39.5 mm 的减少量, 贡献率为 42.8%。而当把突变期进一步划分为 1986 年-2000 年及 2000 年-2013 年两个阶段, 由水文模拟法量化不同时期各因素对径流减少的贡献率时, 可以发现人类活动的贡献率由 44.7% 增加到了 77.8%, 说明人类活动不仅是汉江上游径流减少的主要原因, 并且其对径流变化的影响呈现显著的增长趋势。

表 4 基于水文模拟法对气候变化和人类活动影响的定量区分

Tab. 4 Separating the effects of climate change and human activities by hydrological modeling method

时期	Q_{obs} /mm	Q_{sim} /mm	ΔQ /mm	ΔQ_H /mm	ΔQ_C /mm	ΔQ_H (%)	ΔQ_C (%)
1961-1985	428.4	429.7					
1986-2000	314.3	365.3	-114.1	-51.0	-63.1	44.7	55.3
2001-2013	358.7	412.9	-69.7	-54.2	-15.5	77.8	22.2
1986-2013	336.2	388.9	-92.2	-52.7	-39.5	57.2	42.8

3.2.2 弹性系数法定量区分径流变化影响因子

采用弹性系数法定量区分各因子对径流变化的影响是在年尺度上进行的。干燥指数是基于 Budyko 假设的弹性系数法分离径流变化影响因子的一个关键输入变量,可根据公式 $\phi = E_0/P$ 确定流域的

干燥指数,其中, E_0 为流域多年平均潜在蒸散发, P 为流域多年平均降水量。然后根据公式(3)、(4),采用 6 种基于 Budyko 假设的函数形式计算径流对降水的弹性系数及各因子对径流变化的影响结果见表 5。

表 5 基于弹性系数法对气候变化和人类活动影响的定量区分

Tab. 5 Separating the effects of climate change and human activities by climate elasticity method

	Schreiber	OI dekop	Budyko	Turc Pike	Fu	Zhang	平均值
ϵ_p	1.55	1.43	1.31	1.48	1.46	1.45	1.45
$\Delta Q_C / \text{mm}$	-42.7	-39.8	-36.8	-40.9	-40.4	-40.3	-40.1
$\Delta Q_H / \text{mm}$	-49.5	-52.4	-55.4	-51.3	-51.8	-51.9	-52.1
$\Delta Q_C (\%)$	46.3	43.1	39.9	44.4	43.8	43.7	43.5
$\Delta Q_H (\%)$	53.7	56.9	60.1	55.6	56.2	56.3	56.5

计算结果显示,采用 6 种基于 Budyko 假设的函数形式估算径流对降水的敏感性系数在 1.31~1.55 之间,弹性系数大小十分接近,均值为 1.45。气候变化对径流变化的贡献率在 39.9%~46.3% 之间,人类活动对径流变化的贡献率在 53.7%~60.1% 之间,其平均值分别为 43.5% 和 56.5%,表明人类活动对流域径流减少的影响要高于气候变化产生的影响,与水文模拟法的计算结果较为一致。

3.3 讨论

本文采用水文模拟法和弹性系数法相互交叉验证的方式对汉江上游径流变化的影响因素进行定量区分。这两种方法不论在原理上还是计算尺度上都具有很大的差异性:(1)在原理上,水文模拟法基于水文模型还原突变期的天然径流量,能够保证还原的突变期天然流量与基准期实测径流量在成因上具有一致性,而弹性系数法在水量平衡方程和 Budyko 水热平衡耦合理论的基础上计算径流对降水及蒸发的敏感性;(2)在时间尺度上,水文模拟法基于月尺度计算,可以更充分地利用观测数据,得到更加精确的径流变化过程。而弹性系数法基于年尺度,时间尺度较为粗糙,但对数据的要求较低。两种方法虽然基于不同的原理和计算尺度但却得到了较为一致的结果,即人类活动对汉江上游径流减少的影响率为 56.5%~57.2%,气候变化的影响率为 42.8%~43.5%,人类活动是导致汉江上游径流减少的较为主要的原因。

采用水文模拟法对突变期(1986 年-2000 年、2001 年-2013 年)的模拟结果显示,人类活动对径流减少的贡献率与气候变化相比呈显出了明显的增长趋势。这与李凌程等^[25]采用弹性系数法、降水-径流双累积曲线法及累积量斜率变化率比较法对汉

江上游气候变化和人类活动对流域径流变化影响的分析结果是一致的,但其采用的方法均属于统计方法范畴,缺乏一定的物理机制。Sun 等^[26]采用 1970 年-2000 年的数据对汉江上游径流减少的影响因素进行探究,结果显示气候变化对 1990 年-2000 年汉江上游径流减少的贡献率为 65%,与本文对 1986 年-2000 年的贡献率分离结果一致,但本文的研究结果进一步表明了 2001 年-2013 年人类活动对汉江上游径流变化的影响率呈现显著增加。

4 结论

(1) 汉江上游 1961 年-2013 年年降水及年潜在蒸散发均无显著下降趋势,而年径流呈显著下降趋势,且在 1985 年左右发生突变,突变点前后年径流量减少了 21.5%。

(2) 基于水文模拟法和弹性系数法定量区分汉江上游气候变化和人类活动对流域径流变化的影响,结果显示气候变化对径流变化的贡献率为 42.8%~43.5%,人类活动对径流变化的影响率为 56.5%~57.2%,人类活动是导致汉江上游径流减少较为主要的原因,且人类活动对径流变化的影响率在近期呈现显著增强的趋势。

定量评估气候变化和人类活动对水文过程的影响,能够为合理开发利用汉江水资源提供有价值的参考,但人类活动对径流的影响既包括直接取水产生的直接影响,也包括改变流域下垫面等活动产生的间接影响,本文将各类人类活动的作用视为了一个整体,如何进一步细化径流变化对不同人类活动的响应还需要更加深入地探讨。

参考文献(References):

[1] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环

- 影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 779-790. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jiayun, ZHANG Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 779-790. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.07001
- [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[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 278-285. (DONG Leihua, XIONG Lihua, YU Kunxia, et al. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 278-285. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2012.02.022
- [3] Budyko M I. Climate and Life[M]. San Diego, CA: Academic, 1974.
- [4] 胡珊珊, 郑红星, 刘昌明, 等. 气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 62-70. (HU Shanshan, ZHENG Hongxing, LIU Changming, et al. Assessing the impacts of climate variability and human activities on streamflow in the water source area of Baiyangdian Lake[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(1): 62-70. (in Chinese)) DOI: 10.11821/xb201201007
- [5] Xu X Y, Yang D W, Yang H B, et al. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe basin[J]. Journal of Hydrology, 2014, 510: 530-540. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.12.052
- [6] Xia J, Zeng S D, Du H, et al. Quantifying the effects of climate change and human activities on runoff in the water source area of Beijing, China[J]. Hydrological Sciences Journal, 2014, 59(10): 1794-1807. DOI: 10.1080/02626667.2014.952237
- [7] 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 Jiayun, 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))
- [8] Zhang Q, Liu J Y, Singh V P, et al. Evaluation of impacts of climate change and human activities on streamflow in the Poyang Lake basin, China[J]. Hydrological Processes, 2016, 30: 2562-2576. DOI: 10.1002/hyp.10814
- [9] Zeng S D, Xia J, Du H. Separating the effects of climate change and human activities on runoff over different time scales in the Zhang River basin[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2014, 28: 401-413. DOI: 10.1007/s00477-013-0769-8
- [10] Allen R G, Pereira L S, Raes D et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, 1998: 300.
- [11] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [12] Kendall M G. Rank correlation measures[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [13] 张爱静. 东北地区流域径流对气候变化与人类活动的响应特征研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013. (ZHANG Aijing. Research on the streamflow responses to climate variability and human activities in northeast China[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [14] Schreier P. Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wassermenge der Flüsse in Mitteleuropa[J]. Zeitschrift für Meteorologie, 1904, 21(10): 441-452.
- [15] O'leary E M. On evaporation from the surface of river basins[J]. Transactions on meteorological observations, University of Tartu, 1911, 4, 200.
- [16] Budyko M I. Evaporation under natural conditions[M]. Leningrad: Gidrometeorizdat, 1948.
- [17] Pike J G. The estimation of annual runoff from meteorological data in tropical climate[J]. Journal of Hydrology, 1964, 2: 116-123.
- [18] 傅抱璞. 论路面蒸发的计算[J]. 大气科学, 1981, 5(1): 23-31. (FU Baopu. On the calculation of the evaporation from land surface[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1981, 5(1): 23-31. (in Chinese))
- [19] Zhang L, Hickel K, Dawes W, et al. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation change at catchment scale[J]. Water Resources Research, 2001, 37: 701-708.
- [20] Xia J. A system approach to real-time hydrologic forecast in watersheds[J]. Water International, 2002, 27(1): 87-97.
- [21] 夏军, 王纲胜, 谈戈, 等. 水文非线性系统与分布式时变增益模型[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(11): 1062-1071. (XIA Jun, WANG Gangsheng, TAN Ge, et al. Nonlinear system approach and distributed time variant gain models[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2004, 34(11): 1062-1071. (in Chinese))
- [22] 夏军, 叶爱中, 乔云峰, 等. 黄河无定河流域分布式时变增益水文模型的应用研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2007, 15(4): 457-465. (XIA Jun, YE Aizhong, QIAO Yunfeng, et al. An applied research on distributed time variant gain hydrological model in Wuding River of Yellow River[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2007, 15(4): 457-465. (in Chinese))
- [23] 王纲胜, 夏军, 谈戈, 等. 潮河流域时变增益分布式水循环模型研究[J]. 地理科学进展, 2002, 21(6): 573-582. (WANG Gangsheng, XIA Jun, TAN Ge, et al. A research on distributed time variant gain model: a case study on Chaobai River basin[J]. Progress in Geography, 2002, 21(6): 573-582. (in Chinese))
- [24] 夏军, 王纲胜, 吕爱锋, 等. 分布式时变增益流域水循环模拟[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 789-796. (XIA Jun, WANG Gangsheng, LYU Aifeng, et al. A research on distributed time variant gain modeling[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(5): 789-796. (in Chinese))
- [25] 李凌程, 张利平, 夏军, 等. 气候波动和人类活动对南水北调中线工程典型流域径流影响的定量评估[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(2): 118-126. (LI Lingcheng, ZHANG Liping, XIA Jun, et al. Quantitative assessment of impacts of climate variability and human activities on runoff change in the typical basin of the middle route of the South to North Water Transfer Project[J]. Advances in Climate Change Research, 2014, 10(2): 118-126. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2014.02.006
- [26] Sun Y, Tian F Q, Yang L, et al. Exploring the spatial variability of contributions from climate variation and change in catchment properties to streamflow decrease in a mesoscale basin by three different methods[J]. Journal of Hydrology, 2014, 508: 170-180. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.11.004