

环境变化对湘江湘潭站径流的影响研究

任 政¹, 盛 东², 张 丽¹

(1. 河北工程大学 水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 湖南省水利水电科学研究所 水资源管理研究中心, 长沙 410007)

摘 要:环境变化引起河川径流的显著变化,为水文水资源管理带来新的挑战,如何区分气候变化和人类活动对径流的影响是水文科学研究的热点和难点。基于 STARS 和 Pettitt 方法,综合检验径流时间序列的突变点,构建天然期径流过程模拟的水文模型,将人类活动期的径流过程还原到天然状态,并从不同年代和不同水平年的角度探讨环境变化对人类活动期的径流影响。结果表明:1992 年为湘潭站 1957—2014 年径流时间序列的突变点,新安江模型对湘潭站天然期径流过程具有较好的模拟效果,人类活动和气候变化引起人类活动期径流增加的贡献率分别为 68.24% 和 31.76%,气候变化影响最大的时间为 2011—2014 年,人类活动影响最大的时间为 2001—2010 年,尤以丰水年影响最大。

关键词:环境变化; 突变点; 新安江模型; 径流

中图分类号:P333.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)06-0145-05

Impact of Environmental Change on the Runoff of Xiangtan Hydrological Station in Xiangjiang Basin

REN Zheng¹, SHENG Dong², ZHANG Li¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China; 2. Water Resources Management Research Center, Hunan Water Resources and Hydropower Research Institute, Changsha 410007, China)

Abstract: The significant runoff changes forced by environment changes have brought new challenges for hydrology and water resources management. How to identify impacts of climate change and human activities to runoff change is a hot and difficult topic in hydrological science research. Firstly, the abrupt point of annual runoff time series is identified by comprehensive analysis based on STARS and Pettitt method and divided into natural and human activity period. Secondly, the hydrological model is built to simulate runoff process of natural period. Thirdly, the runoff processes of human activity period are simulated by the hydrological model. Lastly, the impact of environmental change on runoff change during human activity period is discussed under every decade and different year of precipitation frequency. The results show that the abrupt point from 1957 to 2014 is in 1992 for annual runoff time series of Xiangtan station in Xiangjiang Basin, there is very good agreement between measurements and calculations for natural runoff process based on Xinanjiang hydrological model, and the contribution rates of human activities and climate change to runoff change during human activity period are 68.24% and 31.76%, respectively, when the biggest times of climate change impact are in 2011—2014 but of human activity is in 2001—2010 especially at high precipitation year.

Keywords: environmental change; abrupt point; Xinanjiang model; runoff

环境变化主要包括气候变化和人类活动。气候变化已成为国家政治外交的重要议题,在 20 世纪的 100 年中,全球平均气温上升了 0.14~0.16℃,降水也发生了显著的变化^[1]。工业化、城镇化、公铁路交通、跨流域水利工程等建设和发展,导致下垫面受到

人类活动影响越来越突出。在气候变化和人类活动的双重作用下,水文过程也发生了显著变化,从而增加了水资源管理的复杂性^[2]。因此,环境变化对径流的影响已引起国内外学者的广泛关注和研究。

综合国内外已有研究^[3-6],量化环境变化对径流

收稿日期:2015-11-17

修回日期:2015-11-28

资助项目:河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2016027);河北省应用基础研究计划(15967663D-1);湖南省水利科技项目([2013]243-17; [2013]170-19; [2015]13-34)

第一作者:任政(1975—),男,四川蓬溪人,博士,研究方向为水文物理规律及径流模拟。E-mail:hdrenzhang@126.com

通信作者:盛东(1979—),男,湖南衡南人,博士,高级工程师,研究方向为水文水环境。E-mail:shengdong1979@126.com

影响的方法主要包括弹性系数法和水文模型模拟法。水文模型模拟法的关键是如何合理划分天然期和人类活动期,主要包括实地调查法和数理统计法。实地调查往往需要研究区大量的工程数据,工作繁杂,而当研究区面积较大时,众多大型工程的连续修建,可能导致天然期划分不清晰。统计方法仅用径流序列分析突变点,以此划分天然期和人类活动期的依据,该方法显得更为简单,然而仅依靠某一种评价人类活动期径流相对天然基准期的变化,存在很大的不确定性。因此,本文选择适合湿润地区水文过程模拟的新安江水文模型,采用 STARS 检验和 Pettitt 检验综合分析径流时间序列的突变点,量化环境变化对湘江湘潭站径流变化的影响。

在 20 世纪 90 年代前后,湘潭流域人类活动频繁,林草植被破坏严重。由于流域内易蚀母质发育的土壤比例大,造成湘潭流域下垫面发生巨大变化,导致 21 世纪初期径流量显著增加。因此,定量分析湘潭站径流量变化原因是湘江流域水资源科学管理与合理开发利用的基础。

1 水文时间序列突变点分析方法

时间序列变异是指序列分布或参数在时程上具有显著变化,即序列不再具有相同物理成因。目前,识别时间序列突变的方法主要包括 Lee-Heghinian 法, Brown-Forsythe, Mann-Kendall, Pettitt 检验, STARS 检验, R/S 检验等^[7]。本文采用 STARS 检验^[8]和 Pettitt 检验^[3,9]综合分析水文时间序列的突变点。

1.1 STARS 均值检验

STARS (sequential t-test analysis of regime shifts) 均值检验是 Rodionov 在 2005 年提出来的。对于水文时间序列 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 其基本步骤为:

Step1: 设置变量 X 的状态长度 l , 则序列划分的状态数 $m = \text{int}(n/l)$, int 为取整。

Step2: 计算相邻两个状态均值的离差系数 diff 。

$$\text{diff} = t \sqrt{2s_l^2/l} \quad (1)$$

式中: t 为自由度 $2l-2$, 显著性水平 p 的 T 分布值; 假设前后两个状态的方差相等, 且等于平均方差 s_l^2 。

$$s_l^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left[\frac{1}{l-1} \sum_{k=1}^l (y_{kj} - \bar{y}_j)^2 \right] \quad (2)$$

式中: y_{kj} 为第 j 个状态第 k 个变量的值, 是序列状态划分的结果, 即 $x_i \rightarrow y_{kj}; \bar{y}_j = (1/l) \sum_{k=1}^l y_{kj}$ 。

Step3: 计算变量 X 初始状态长度 l 的均值 \bar{x}_{cur} 。对于当前点 t_{cur} , 随后加入数据 $x_{t_{\text{cur}}}$, 判断 $x_{t_{\text{cur}}}$ 是否为

突变点。选择 $x_{t_{\text{cur}}}$ 后长度为 l 的变量 X , 计算其均值 \bar{x}_{pas} , 计算状态变化的临界均值 $\bar{x}_{\text{crit}}^{\uparrow} = \bar{x}_{\text{cur}} \pm \text{diff}$ 。

$$\begin{cases} \text{if } \bar{x}_{\text{pas}} \geq \bar{x}_{\text{cur}} & \bar{x}_{\text{crit}} = \bar{x}_{\text{cur}} + \text{diff} & \text{Sgn} = 1 \\ \text{if } \bar{x}_{\text{pas}} < \bar{x}_{\text{cur}} & \bar{x}_{\text{crit}} = \bar{x}_{\text{cur}} - \text{diff} & \text{Sgn} = -1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: Sgn 为符号标志。

Step4: 判断当前点 $x_{t_{\text{cur}}}$ 是否存为突变点。计算状态突变指数 RSI (Regime Shift Index)。

$$\text{RSI} = \frac{1}{ls_l} \sum_{t=t_{\text{cur}}}^m (x_t - \bar{x}_{\text{crit}}) \quad m = t_{\text{cur}}, t_{\text{cur}} + 1, \dots, t_{\text{cur}} + l - 1 \quad (4)$$

对于检验期 t_{cur} 到 $t_{\text{cur}} + l - 1$ 。当 $\text{Sgn} = 1$ 时 $\text{RSI} < 0$ 或者 $\text{Sgn} = -1$ 时 $\text{RSI} > 0$, 当前点 t_{cur} 不是突变点; 否则 $x_{t_{\text{cur}}}$ 为突变点。

1.2 Pettitt 检验

Pettitt 检验法是由 Pettitt 于 1979 年提出来的。一种非参数时间序列的突变点检验方法。对于水文时间序列 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 基本步骤如下:

Step1: 将水文时间序列划分为 $X_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_t\}$ 和 $X_2 = \{x_{t+1}, x_{t+2}, \dots, x_n\}$, 其中 $t = 2, 3, \dots, n$, 统计量 $U_{t,n}$ 计算公式为:

$$U_{t,n} = U_{t-1,n} + \sum_{i=1}^n \text{sgn}(x_t - x_i) \quad (5)$$

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

Step2: 计算统计量 $K_{T,n} = \max |U_{t,n}|$ 。

Step3: 计算 $p_T = 2 \exp[-6(K_{T,n})^2 / (n^2 + n^3)]$ 。对于显著性水平 p , 如果 $p_T \leq p$, 则认为 T 点为突变点。

2 新安江水文模型

新安江模型是 1973 年赵人俊提出的一个概念性水文模型, 主要适用于湿润与半湿润地区, 在国内外得到广泛应用和发展。本文采用新安江日模型的三层蒸发模式, 蓄满产流理论, 水箱概念模型的三水源划分和线性水库汇流计算。

新安江日模型输入为日降水量和日蒸发量, 输出为日径流量, 待率定参数 13 个, 其物理意义和取值范围见表 1。

3 研究区域和数据资料

湘江为长江的七大支流之一, 发源于广西临桂县海洋山, 沿途接纳湖南省 14 条之流进入洞庭湖, 全长 856 km, 流域面积 94 660 km²。湘潭水文站是湘江流域内一个重要国家水文站, 集水面积 81 638 km², 多年平均降水量为 1 510 mm, 气温为 17℃, 径流系数为 0.524, 属典型的湿润流域。

表 1 新安江模型参数及其取值范围

序号	参数名	意义描述	模型结构组分	取值范围
1	W_M	当前土壤蓄水量	蒸发模式	100~170
2	W_{UM}	当前上层土壤蓄水量	蒸发模式	5~20
3	W_{LM}	当前下层土壤蓄水量	蒸发模式	60~90
4	C	深层土壤的蒸散发系数	蒸发模式	0.08~0.2
5	B	蓄水容量曲线的指数	蓄满产流	0.1~0.4
6	K_c	流域蒸散发能力的折算系数	蒸发模式	0.60~1
7	E_x	自由水蓄量分布曲线指数	三水源划分	1.0~2.0
8	S_M	自由水蓄水库容量	三水源划分	5~50
9	K_1	自由水蓄水库对壤中流的出流系数	三水源划分	0~0.7
10	K_G	自由水蓄水库对地下水的出流系数	三水源划分	0~0.7
11	C_s	地表径流的消退系数	地表汇流	0.4~1.0
12	C_1	壤中流的消退系数	壤中流汇流	0.4~1.0
13	C_G	地下径流的消退系数	地下汇流	0.98~1.0

研究区分布 8 个国家气象站,除南岳外,海拔范围在 100~200 m,水文气象数据的时段为 1957 年 1 月 1 日—2014 年 12 月 31 日,共 58 a。气象站点的日降水和平均气温数据来源《中国气象科学数据共享服务网》,湘潭水文站日径流数据来源《湖南水文公众信息网》。经分析,各站点的年降水和年气温的离均系数分别为 0.065~0.067,0.012~0.018。因此,采用算术平均法计算研究区域面平均降水和面平均气温。

由于研究区缺乏蒸发数据,而蒸发量主要由水体表面接受的辐射决定,气温是辐射大小综合反映,采用 McCloud 计算流域蒸发能力^[10],即:

$$E_0 = K \cdot W^{1.8T} \tag{6}$$

式中: T 为日平均气温; E_0 为流域蒸发能力; K 和 W 为待求参数。根据长沙气象站的日平均气温和蒸发资料,率定式(4)的参数,如图 1 所示。

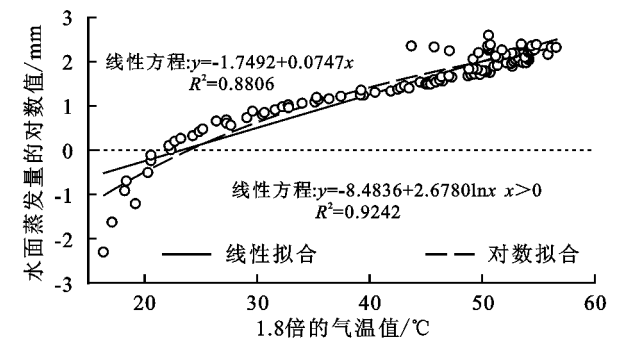


图 1 长沙站水面蒸发与气温的关系

从图 1 中可以看出,结合式(6),流域蒸发能力计算公式为:

$$E_0 = \begin{cases} \exp[2.678\ln(1.8T) - 8.4836] & T \geq 0 \\ 0.1739 \times 1.0768^{1.8T} & T < 0 \end{cases} \tag{7}$$

式中的符号同(6)式。

4 结果与分析

4.1 湘潭站径流时间序列的天然期划分

取长度 $l=8$,显著性水平 $p=0.05$,计算 $s_i^2=0.0057$ 和 $\text{diff}=0.0719$,计算状态突变指数 RSI,年径流存在两个突变点,分别为 1992 年和 2007 年。采用 Pettitt 检验年径流时间序列分析,计算的 U 值,在 1991 年达到最大,且 $p_T=0.1609$,即 1992 年为序列的突变年,但显著性水平 $p=0.05$ 突变不显著。综合上述两种方法分析结果,本文选择 1959—1991 年作为湘潭站径流时间序列的天然期。在新安江模型参数率定过程中,考虑到模型的状态变量(如土壤含水量)对模拟值的影响,以 1957—1958 年作为模型的预热期,1959—1986 年作为模型参数的率定期,1987—1991 年作为模型参数的验证期。

4.2 湘潭站天然期径流模拟

采用 Nash_sutcliffe 模型效率系数 R^2 为目标函数^[5],SCE-UA 优化算法^[11]率定新安江模型参数,1959—1986 年湘江湘潭站逐月径流实测与模拟过程,如图 2 所示。

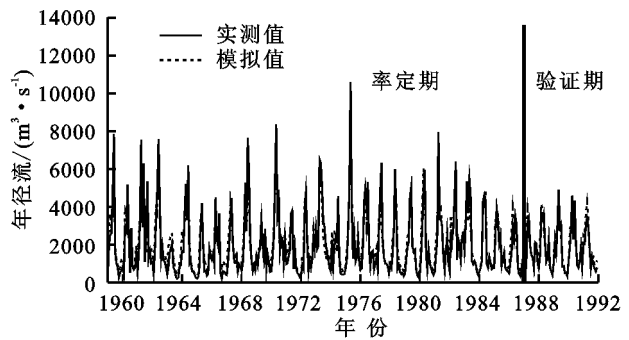


图 2 湘江湘潭站天然期逐月径流实测与模拟过程

从图 2 可以看出,月径流的实测值与模拟值基本吻合。统计分析,率定期和验证期月径流模拟的 R^2 分别为 0.875 9、0.838 3,实测值和模拟值的总体相对误差分别为-5.12%和-6.85%,模拟值略微高估实测值。年径流的模拟值与实测值较为接近,率定期 R^2 为 0.856 9,最大相对误差为-19.13%,平均相对误差为-7.64%。因此,新安江模型还原人类活动期的径流过程具有较高的可信度。

4.3 环境变化对径流影响分析

根据上述构建的水文模型,结合湘潭流域 1992 年以后的气象数据,模拟人类活动期逐月径流过程,如图 3 所示。

将人类活动期依年代划分为三个时段,即 1992—2000 年、2000—2010 年和 2010—2014 年。按照式(8)—(12)计算环境变化对人类活动期径流的影响。

$$\Delta W_T = W_{HR} - W_B \tag{8}$$

$$\Delta W_H = W_{HR} - W_{HN} \tag{9}$$

$$\Delta W_C = W_{HN} - W_B \tag{10}$$

$$\eta_H = \Delta W_H / \Delta W_T \tag{11}$$

$$\eta_C = \Delta W_C / \Delta W_T \tag{12}$$

式中: ΔW_T 为径流变量总量; W_{HR} 为人类活动期实测径流量; W_B 为天然期实测径流量; ΔW_H 为人类活动对径流的影响量; W_{HN} 为人类活动期径流还原值; ΔW_C 为气候变化对径流的影响量。 η_H 和 η_C 分别为人类活动和气候变化对径流的影响百分比。

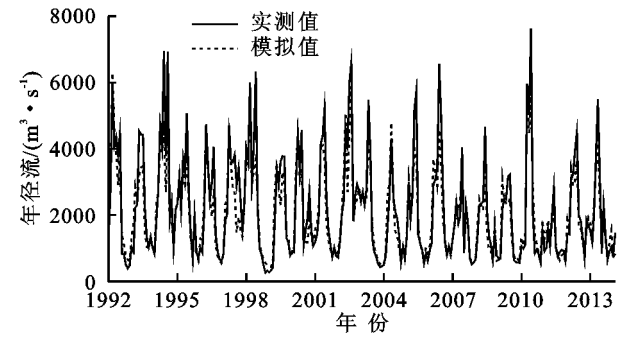


图 3 湘江湘潭站人类活动期逐月径流实测与模拟过程

表 2 环境变化对径流的影响分析

阶段	1959—1991 年	1992—2000 年	2001—2010 年	2011—2014 年	1992—2014 年
实测径流/mm	764.36	948.01	808.59	720.37	847.80
还原径流/mm		860.43	766.93	694.13	790.86
实测降水/mm	1501.21	1614.77	1490.41	1400.17	1523.38
实测气温/℃	16.80	17.25	17.79	17.62	17.55
径流增加量/mm		183.65	44.23	-43.99	83.44
气候变化影响/mm		96.07	2.58	-70.23	26.50
气候变化影响/%		52.31	5.82	159.64	31.76
人类活动影响/mm		87.58	41.66	26.24	56.94
人类活动影响/%		47.69	94.18	-59.64	68.24

从表 2 中可以看出:(1) 与天然期相比,人类活动期实测径流增加,在 90 年代达到最大,而后呈现减小的趋势,增幅分别为天然期的 24.03%、5.79%和-5.76%;(2) 实测降水过程呈现与径流相一致的变化趋势,而最大降水深度为 2002 年的 2 101 mm,人类活动期年降水分别为天然期的 108%、99%和 93%,气温在整体上出现一个递增趋势,而近几年略有减小的迹象,人类活动期多年平均气温增幅分别为天然期的 2.68%、5.89%和 4.88%;(3) 人类活动对径流影响的绝对量均为正值,且呈现递减趋势,表明人类活动引起下垫面改变增大了产流能力,这与 20 世纪 90 年代

末湖南省水土流失严重相一致^[12];(4) 气候变化对径流影响的绝对值与径流变化是相一致的,呈现先增加后减小的趋势,表明湘潭径流变化主要受控于降水;(5) 环境变化对径流影响的相对程度而言,径流增加的主要因素为人类活动,从各阶段看来气候变化对径流影响最大的阶段为 2011—2014 年,人类活动对径流影响最大的阶段为 2001—2010 年。

根据人类活动期的降水时间序列,按频率 10%、50%和 90%分别选择丰、平和枯水年的典型代表年,采用还原径流分析人类活动对不同水平年径流的影响,见表 3。

表 3 人类活动对不同水平年径流的影响分析

项目	年份	降水量	实测径流	还原径流	绝对影响量	相对影响量/%
丰水年	1994	1980.86	1264.20	1052.33	211.87	16.76
平水年	2004	1508.55	647.55	662.36	-14.81	-2.29
枯水年	2003	1161.54	770.10	744.44	25.66	3.33

从表 3 可以看出,人类活动对不同水平年的径流影响是不相同的。人类活动对丰水年的径流影响最大,枯水年次之,平水年最小。平水年和枯水年人类活动相对

影响量较小,其绝对值分别为 2.29%和3.33%,且均小于年径流模拟的平均相对误差的绝对值。为避免水文模型模拟误差的影响,采用天然期不同水平年径流模拟

的误差修正人类活动期对应水平年的还原径流。按天然期降水序列,选择三个频率的代表年,见表 4。

水位小,而在低水位最大,这与率定水文模型的目标函数是一致的。用天然期不同水平年径流模拟的相对误差对表 3 中人类活动期的还原径流进行修正,见表 5。

从表 4 中可以看出,在天然期模拟相对误差在

表 4 天然期不同水平年径流模拟的误差分析 1

项目	年份	降水量	实测径流	模拟径流	绝对误差	相对误差* / %
丰水年	1975	1944. 42	1088. 18	1100. 73	-12. 55	-1. 14
平水年	1964	1446. 12	815. 82	894. 98	-79. 16	-8. 84
枯水年	1974	1244. 65	567. 11	622. 30	-55. 19	-8. 87

注: * 相对误差 $e = (W_m - W_s) / W_s$, W_m 和 W_s 分别为年径流的实测值和模拟值。

表 5 人类活动对不同水平年径流的影响分析 2

项目	年份	降水量	实测径流	还原径流* *	绝对影响量	相对影响量 / %
丰水年	1994	1980. 86	1264. 20	1040. 33	223. 87	17. 71
平水年	2004	1508. 55	647. 55	603. 81	43. 74	6. 75
枯水年	2003	1161. 54	770. 10	678. 41	91. 69	11. 91

注: * * 用表 4 中不同水平年的模拟误差对表 3 中的还原径流进行修正后的径流。

从表 5 可以看出,人类活动对不同水平年均为正影响,其中丰水年影响最大、枯水年次之、平水年最小。与表 3 对比,尽管人类活动对不同水平年径流影响的评价在数量上不同,但在定性上评价是相一致的:在人类活动期,人类活动对丰水年径流影响最大,而平水年影响最小。究其原因表现在流域内城市化加快、道路交通建设的快速发展等:一方面导致植被破坏,水土流失加剧,流域涵养水源的能力降低;另一方面流域内硬化地面的比例增加,提高了降水的产流效率,致使天然期和人类活动期在相同的气候条件下,流域的径流量增加。

5 结论

(1) 湘潭站 1957—2014 年的径流序列,STARS 均值检验存在 1992 年和 2007 年两个突变点,Pettitt 检验存在 1992 年的突变点。因此,将径流时间序列 1992 年以前划分为天然期。

(2) 天然期月径流模拟率定期和验证期的效率系数分别为 0. 875 9,0. 838 3,年径流的模拟值与实测值接近,率定的水文模型还原人类活动期径流模拟具有较高的可信度。

(3) 气候变化和人类活动对人类活动期径流影响不同。从整个人类活动期来看,人类活动和气候变化引起径流增加贡献分别为 68. 24% 和 31. 76%;从各时段来看,人类活动引起径流变化最大为 2001—2010 年的 94. 18%,气候变化对径流影响最大为 2011—2014 年的 159. 64%;从不同水平年来看,人类活动对径流影响最大的为丰水年,枯水年次之,平水年最小。

参考文献:

[1] IPCC. Climate Change, Impacts, Adaptation, and Vulnerability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

[2] Jiang T, Fischer T, Lu X. Larger Asian rivers: climate change, river flow, and watershed management [J]. Quaternary International, 2010,226(1):1-3.

[3] Zhao G, Tian P, Mu X, et al. Quantifying the impact of climate variability and human activities on streamflow in the middle reaches of the Yellow River basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2014,519:387-398.

[4] 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, 2015,522:326-338.

[5] Ahn K H, Merwade V. Quantifying the relative impact of climate and human activities on streamflow[J]. Journal of Hydrology, 2014,515:257-266.

[6] 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.

[7] 周园园,师长兴,范小黎,等. 国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J]. 地理科学进展. 2011,30(11):1361-1369.

[8] Rodionov S, Overland J E. Application of a sequential regime shift detection method to the Bering Sea ecosystem [J]. ICES Journal of Marine Science,2005,62(3): 328-332.

[9] 张晓萍,张橹,王勇,等. 黄河中游地区年径流对土地利用变化时空响应分析[J]. 中国水土保持科学,2009,7(1):19-26.

[10] 刘晓英,李玉中,王庆锁. 几种基于温度的参考作物蒸散量计算方法的评价[J]. 农业工程学报,2006,22(6): 12-18.

[11] 任政,盛东. 基于多目标 GLUE 算法的新安江模型参数不确定性研究[J]. 水电能源科学,2016,34(4):31-35.

[12] 高连杰,潘双华,董艾辉. 环境也是资源—湖南省生态环境现状调查[J]. 长沙通信职业技术学院学报,2008,7(3):65-69.