



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.03.002

李继清, 朱一鸣, 李建昌, 等. 变化环境对潮河下游径流一致性的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 05-12. LI Ji qing, ZHU Yi ming, LI Jian chang, et al. Impacts of changing environment on runoff consistency in the lower reaches of Chao River[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 05-12. (in Chinese)

变化环境对潮河下游径流一致性的影响

李继清, 朱一鸣, 李建昌, 纪昌明

(华北电力大学 可再生能源学院 北京 102206)

摘要: 水文分析要求径流资料的时间序列一致性, 但变化的环境破坏了径流序列的稳定一致性变化规律。在气候变化和频繁的人类活动的影响下(水利工程建设、植被覆盖改变和城市化建设等), 流域的下垫面条件和产流物理机制发生了明显变化, 导致径流序列出现变异情况, 不能满足频率计算分析水文时间序列一致性的要求和同分布的假定。应用 Mann Kendall 非参数秩次检验法、Pettitt 检验法、方差分析法对潮河流域下游下会站 1976 年-2012 年的年、月径流和降水时间序列的趋势成分、突变成分、周期成分和随机成分分别进行了检验和识别, 并通过对比分析降雨和径流时间序列的成分, 推断出气候变化和人类活动对潮河流域下游降水和径流演变过程的影响。

关键词: 潮河流域下游; 径流一致性; Mann Kendall 检验法; Pettitt 检验法; 方差分析法

中图分类号: TV 122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)03-0005-08

Impacts of changing environment on runoff consistency in the lower reaches of Chao River

LI Ji qing, ZHU Yi ming, LI Jian chang, JI Chang ming

(Renewable Energy School, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Hydrological analysis requires the time series consistency of runoff data, but the changing environment ruins the stability of runoff series. Under the influence of climate change and frequent human activities(water conservancy project construction, change of vegetation cover, and urbanization construction), the underlying surface conditions and physical mechanism of runoff yield have undergone obvious changes, resulting in runoff series variation, which can not meet the consistency requirement and identical distribution assumption of hydrological time series. In this paper, we identified the trend components, mutation components, cyclical components, and random components of the annual and monthly runoff and rainfall time sequences recorded at the Xiahui Station in the lower reaches of Chao River during 1976-2012 by using non parametric Mann Kendall rank test, Pettitt test, and variance analysis. By comparing these components between runoff and rainfall time sequences, this paper concludes that the rainfall is not the only one factor that leads to runoff changes, and that climate change and human activities both influence the evolution process of the lower reaches of Chao River basin.

Key words: the lower reaches of Chao River; runoff consistency; Mann Kendall test; Pettitt test; variance analysis

1 研究背景

水利工程项目水文分析要求径流资料时间序列

符合一致性要求, 但变化的环境破坏了径流序列的稳定一致性变化规律。一般认为, 气候变化和人类活动是变化环境中两个重要组成部分, 两者相互作用

收稿日期: 2017-01-15 修回日期: 2017-03-31 网络出版时间: 2017-05-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170506.1644.017.html>

基金项目: 长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2015232/KY); 国家自然科学基金(51641901); 国家重点研发计划项目(2016YFC0402208)

Funds: Open Research Foundation of Changjiang Academy of Sciences(CKWV2015232/KY); National Natural Science Foundation of China(51641901); National Key Research and Development Program of China(2016YFC0402208)

作者简介: 李继清(1972-), 女, 教授, 主要从事水文水资源方面的教学与科研。E-mail: jqli6688@163.com

用,共同影响着全球水文循环系统。在频繁的人类活动的影响下(跨区域调水、水利工程建设、植被覆盖改变和城市化建设等),导致流域的下垫面条件发生了很大的变化,进而在气候变化和人类活动的双重共同作用下,流域的产流物理机制发生了相应变化,改变了流域水文系统的运行模式和方式,导致径流序列出现变异情况,不能满足频率计算分析水文时间序列一致性的要求和同分布的假定^[1]。刘春葵^[2]研究气候变化对径流的影响时,通过将气候变化分为自然气候变异和人为气候变化两部分,并分离出二者的影响,进而对未来的水文时间序列变化趋势进行预测研究。A Chavez Jimenez 等利用水资源系统对气候系统的灵敏度,使气候变化影响实现可视化^[3]。孙宁等以潮河密云水库上游流域为研究对象,发现人类活动会增大流域总蒸发量和入渗量,减少流域总径流,且对枯水年份年径流的影响较大^[4]。郭军庭等^[5]认为潮河流域径流对降水变化的敏感度高于对温度变化的敏感度,并结合流域不同时期的土地利用数据,分析出导致流域年径流量减少的原因是人类活动。李子君等采用降水-径流经验统计模型,评估出潮河流域年径流量明显减少的主要原因是人类活动因素而非降水因素^[6]。张淑兰^[7]、张伟丽^[8]、刘睿^[9]和 Yuzhen Zhang^[10]等分别对泾河上游、永定河流域、淮河上游和太湖流域的降雨、径流、径流模数及蒸发间的变化关系进行了研究,并定量计算分析气候变化和人类活动对径流的影响。

潮河流域下游是密云水库的主要来源,曾是供给北京地表饮用水的主要来源之一。20 世纪 80 年代以来,为控制流域内水土流失和保护流域水质,潮河流域已陆续被列为国家“三北”防护林体系重点建设工程区、国家级水土流失重点治理区、首都水资源规划水土保持重点实验区和京津风沙源区防沙治沙项目区等,通过植树造林等措施来改变流域的覆被和土地利用类型,也改变了下垫面产流输沙的环境,进一步影响流域的降雨径流关系。本文应用 Manr Kendall 非参数秩次检验法、方差分析法和 Pettitt 变点检验法对潮河下游会站的 1976 年-2012 年的月、年径流量和降水时间序列的趋势成分、突变成分、周期成分和随机成分进行了检验和识别,具体分析下会站径流变化的影响因素,并从气候变化和人类活动两个方面对径流一致性的影响进行初步判断和分析,为潮河流域水资源利用和管理提供决策依据。

2 径流一致性分析方法

径流一致性会受到很多外界因素的影响,如气

候变化(降水、蒸发等)、人类活动(建坝筑堤、植树造林等)。不同因素影响下的水文序列会产生不同的组成成分,不同成分之间不仅会相互联系、相互影响,而且对水文序列产生的影响效果也是不同的。水文时间序列一直处在不断变化的状况之中,在其变化中会受到确定性因素和不确定性因素的综合影响。一般水文时间序列中往往包含着确定性因素作用的确定性成分,如趋势成分、突变成分和周期成分等,还包含有不确定性因素作用的不确定性成分,如随机成分等。两种因素在水文变化中相伴相随、共同存在,导致两种不同的变化。实际工程实践中,一般先把时间序列做线性简化,即认为水文时间序列是由各种确定和不确定成分线性叠加而成的,将时间序列看成趋势项、突变项、周期项及随机项的加和,再进一步分析检验。故水文时间序列可用式(1)来描述。

$$R_t = T_t + J_t + P_t + S_t \quad (1)$$

式中: R_t 为水文时间序列样本值; T_t 为水文时间序列的趋势成分; J_t 为水文时间序列的突变成分; P_t 为水文时间序列的周期成分; S_t 为水文时间序列的随机成分。从已剔除了趋势项和突变项后的时间序列中,减去所有计算出的总的周期项后,形成的新的序列作为原始序列的随机成分。故径流一致性的具体检验方法包括三方面:Manr Kendall 非参数秩次检验法(趋势分析)、Pettitt 检验法(突变分析)和方差分析法(周期分析)。

2.1 趋势成分的 Manr Kendall 非参数秩次检验法

Manr Kendall(M-K)^[11]非参数秩次检验法普遍应用于识别和检验各种水文时间序列的趋势成分。假设 x_1, x_2, \dots, x_n 为某一水文元素的时间序列变量, n 为该时间序列的长度,M-K 法定义了统计量 S :

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & x_i - x_j > 0 \\ 0 & x_i - x_j = 0 \\ -1 & x_i - x_j < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, x_i, x_j 分别为第 i, j 年相应的测量值,且 $j < i \leq n$ 。

首先假定时间序列没有任何变化趋势,统计量 S 的均值为 0,其方差为:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

$$\text{则: } Y = \begin{cases} \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, Y 为正态分布的统计量, 选择显著性水平 α , 若 Y 满足 $|Y| > Y_{1-\alpha/2}$, 则拒绝原假设, 认为在显著水平 α 下序列趋势存在。当 $Y > 0$ 时, 表示时间序列有上升的趋势, 当 $Y < 0$ 时, 表示时间序列有下降的趋势^[12]。

2.2 突变成分的 Pettitt 检验法

与 Mann Kendall 检验法类似, Pettitt 检验法也是一种非参数检验方法。该检验法以 Mann Whitney 的统计函数 $U_{i,T}$ 为基础, 认为两个样本 x_1, x_2, \dots, x_i 和 $x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_T$ 均源于同一序列分布。故对于连续的序列, $U(t)$ 和 $V(t)$ 可由式(6)计算得出:

$$U_{i,T} = U_{i-1,T} + V_{i,T} = \sum_{j=1}^T \text{sgn}(x_i - x_j) \quad t = 2, \dots, T \quad (6)$$

$$\text{其中 } \text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

且统计量 U 表示第一个样本的元素值大于第二个样本元素值的次数。突变最有可能出现在 $|U_{i,T}|$ 取最大值的时候, Pettitt 检验的零假设为序列无变异点, 该可能突变点的显著性水平可以通过式(8)计算得出:

$$p = 2 \exp \left[\frac{-6U_{i,T}^2}{T^3 + T^2} \right] \quad (8)$$

给定某一显著性水平 $\alpha = 0.05$, 若 $p \leq \alpha$, 则说明时间序列在显著性水平 α 下发生显著变化^[13]。Pettitt 检验法具有以下优点: (1) 它是一种非参数检验方法, 对某些异常值不敏感; (2) 该方法可以通过近似极限分布计算检测统计 p 值。

2.3 周期成分的方差分析法

方差分析法的原理是: 假定水文时间序列由一定确定数量的周期各异的波线性叠加而形成, 利用统计检验, 按时间顺序依次地辨识出时间序列中一些较为显著的周期成分, 即时间序列中隐含的周期。计算过程中, 若周期表的排列是按照显著周期来进行分组的, 则在这些分组中, 同一分组里的所有数据就属于同一个周期下的数值; 不同分组间的数据就属于不同周期下的数值, 所以不同组之间的数据差异比同组的数据要大。相反地, 当隐含周期试算表的排列不是按照时间序列的显著周期来进行分组的, 不同组之间的数据比同组之间的数据差异要小。因此可通过计算出组内和组间的离差平方和来检验, 利用 F 分布公式比较不同周期分组下的数值, 从而辨识出最显著的周期成分^[14]。如果一个水文

时间序列存在趋势成分、突变成分, 要先把趋势成分和突变成分剔除, 即把时间序列还原成原始状态, 再利用方差分析法来识别所有隐含周期, 并采用此方法依次循环下去直至识别不出周期^[15]。

识别步骤如下。

(1) 样本分组。记 x_1, x_2, \dots, x_n 为时间序列样本, 假定该样本中包含有以 k 个时间段(年、月)为单位的周期, 并依照每 k 年为一组将 x_1, x_2, \dots, x_n 分成 m 个组。

(2) 计算 F 检验统计量。总离差平方和为

$$Q_1^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (9)$$

其中 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, 自由度为 $n-1$, 组间离差平方和

$$Q_2^2 = \sum_{j=1}^k m_0 (x_j - \bar{x})^2 \quad (10)$$

其中 $m_0 = \begin{cases} m & n \text{ 能被 } k \text{ 整除} \\ m-1 & n \text{ 不能被 } k \text{ 整除} \end{cases}$ 自由度为 $k-1$ 。

通过总离差平方和等于组间离差平方和与组内离差平方和的加和可知, 组内离差平方和为

$$Q_3^2 = Q_1^2 - Q_2^2 \quad (11)$$

且自由度为 $(n-k)$ 。计算统计量:

$$F = \frac{Q_1/(k-1)}{Q_2/(n-k)} \quad (12)$$

对给定显著性水平 $\alpha = 0.05$, 若 $F > F_\alpha$, 且若同时出现几个都符合 $F > F_\alpha$ 条件的情况, 则选择 F 最大的那个周期 T 作为最显著周期。

计算时, 对已经剔除了趋势项和突变项后的时间序列 L 使用方差分析法辨识隐含周期, 通过比较不同周期下的 F 值, 找出大于 F_α 的 F 的最大值, 辨识出时间序列 L 的第一隐含周期^[16], 该周期下的各组组内均值, 即为时间序列 L 的第一隐含周期成分值, 再用时间序列 L 减去第一周期的周期项, 便可得到第一余波的时间序列 L_1 。继续对新的时间序列 L_1 使用同样的方法辨识出第二隐含周期。依次类推, 一直计算到辨识出所有隐含周期和余波为止, 即此时再也找不到合适的 F 满足大于 F_α 的条件, 此时已算出所有周期项和其对应的余波, 且时间序列的主周期由第一、二、三……隐含周期依次组成, 所有周期项的值加和就得到时间序列隐含的总的周期项。

3 潮河流域概况和数据资料

潮河发源于河北省丰宁县, 在密云县古北口镇入北京境内, 位于冀北山地 ($116^\circ 10' \text{E} - 117^\circ 35' \text{E}$, $40^\circ 35' \text{N} - 41^\circ 37' \text{N}$), 面积为 $4\,930\,1 \text{ km}^2$ 。下

游的下会站是密云水库入库的主要站点, 约占密云水库上游集水面积的 40%, 北京市地表水资源主要由密云水库(即潮河流域)供应。本文采用潮河流域下游下会站 1976 年- 2012 年的年、月径流

时间序列的数据资料, 包含了月径流量比较明显的丰、平和枯不同水平年及月份(见表 1、图 1), 总的资料长度为 37 年, 共 444 个月, 可以反映年、月径流量的水文变化特征^[17]。

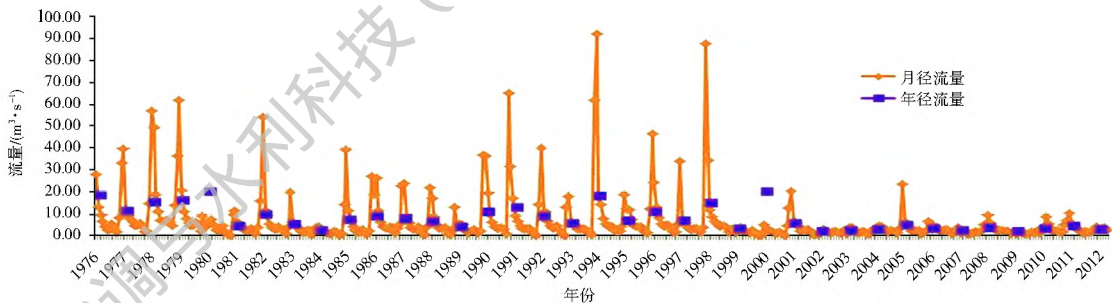


图 1 1976 年- 2012 年年径流和月径流过程

Fig. 1 The annual and monthly runoff processes during 1976-2012

表 1 不同水平年的天然径流量对比

Tab. 1 Comparison of natural runoff across different hydrological years

水平年	丰水年		平水年		枯水年	
	1980 年	2000 年	1987 年	2009 年	1987 年	2009 年
年均流量/(m³·s⁻¹)	19.96	19.96	7.55	1.82		
平均值/(m³·s⁻¹)	7.79	7.79	7.79	7.79		
距平百分数(%)	156.3	156.2	- 3.1	- 76.6		

由图 1 和表 1 可以看出 1980 年和 2000 年均均为丰水年, 且均高于多年平均值 156.3% 左右; 2009 年为枯水年, 低于多年平均值 76.6% 左右; 1987 年为平水年。

4 径流和降水成分分析

利用密云水库入库站——潮河下游下会站径流资料 and 降水资料系列, 作趋势成分、突变成分、周期成分和随机成分的辨别和分析检验, 并进一步分析潮河流域径流量变化的主要影响因素。根据第 2 部分的径流成分提取方法, 分别对下会站 1976 年- 2012 年的年、月径流量和降水量进行趋势、突变、周期随机成分的识别。

4.1 趋势成分分析

4.1.1 径流时间序列趋势分析

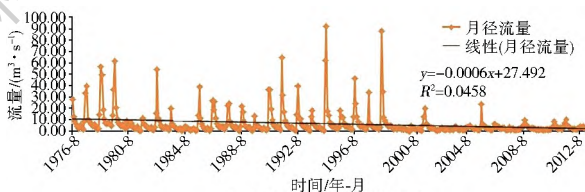
采用 Mann-Kendall (M-K) 非参数秩次检验法对下会站 444 个月的月径流量和 37 年的年径流量进行检验识别, 其计算过程见表 2。

表 2 α = 0.05 的年、月径流序列显著水平检验参数

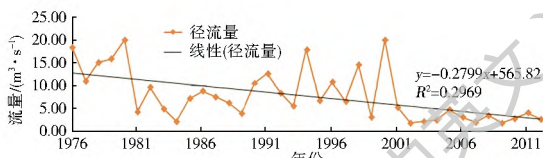
Tab. 2 Results of significance level test of annual and monthly runoff sequences

项目	统计量 S	时段数 n	方差 S	正态分布统计量 Y	显著性检验量 Y _{1-α/2}
月径流量 - 21907	437	9 304	312 67	- 7.18	1.96
年径流量 - 288	37	5 846		- 3.75	1.96

由表 2 数据可得, 假设月径流量序列没有变化趋势, 在显著性水平下 ($\alpha = 0.05$), $|Y| > Y_{1-\alpha/2} = 1.96$, 所以原假设不成立, 认为序列在显著水平 α 下存在趋势。又因为 Y 为负值, 故月径流序列有下降的趋势(图 2(a))。同样, 对年径流量序列, 在显著性水平 α 下, $|Y| > Y_{1-\alpha/2} = 1.96$, 认为年径流序列在显著水平 α 下存在下降趋势。采用线性趋势线对潮河流域下游 1976 年- 2012 年的月径流和年径流趋势进行拟合, 拟合结果见图 2。



(a) 月径流序列及线性趋势



(b) 年径流序列及线性趋势

图 2 1976 年- 2012 年的年径流和月径流序列及线性趋势

Fig. 2 Linear trend of annual and monthly runoff sequences during 1976-2012

由图 2(a) 可看出, 潮河流域下游 1976 年- 2012 年的月径流线性趋势线 $y = - 0.0006x + 27.492$, 由于月径流量数据之间差异较大, 导致线性下降的趋势拟合线的斜率不明显。同时, 由图 2(b) 可看出潮河流域下游 1976 年- 2012 年的年径流线性趋势线 $y = - 0.2799x + 565.8$, 由趋势线的斜率看, 趋势线的下降趋势与 M-K 检验法计算结论一致, 即潮河流域下游 1976 年- 2012 年的年径流存在下降的趋势。虽然月径流线性趋势线也能表明年径流时间序列存在下降趋势, 但通过与年径流线性

趋势线比较可看出,月径流线性趋势线的下降趋势没有年径流线性趋势明显。采用线性模型来拟合提取出趋势成分,根据趋势线模型得到序列趋势项,将每个时间点对应的趋势项从原始径流序列中扣除,就可以去除趋势成分。

4.1.2 降水时间序列趋势分析

采用 Mann-Kendall (MK) 非参数秩次检验法对 444 个月的月降水量和 37 年的年降水量进行检验识别,其计算过程见表 3。

表 3 年、月降水序列显著水平检验参数($\alpha=0.05$)

Tab. 3 Results of significance level test of annual and monthly rainfall sequences ($\alpha=0.05$)

项目	统计量 S	时段数 n	方差 S	正态分布统计量 Y	显著性检验量 $Y_{1-\alpha/2}$	
月降水量	-206.9	444	9758.108	0.67	-0.66	1.96
年降水量	-193	37	5846	-2.51	1.96	1.96

由表 3 数据可得,假设月降水量序列没有变化趋势,在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下, $|Y| \leq Y_{1-\alpha/2} = 1.96$, 所以接受原假设,认为序列在显著水平 α 下不存在趋势,故 1976 年-2012 年月降水序列的变化趋势不明显。但由于 Y 为负值,所以月降水序列理论上是在下降的趋势(图 3(a))。同样,对年降水量序列,在显著性水平 α 下, $|Y| > Y_{1-\alpha/2} = 1.96$, 所以认为年降水时间序列在显著水平 α 下存在下降趋势(图 3(b))。采用线性趋势线对潮河流域下游 1976 年-2012 年的月降水量和年降水量趋势进行拟合,拟合结果见图 3。

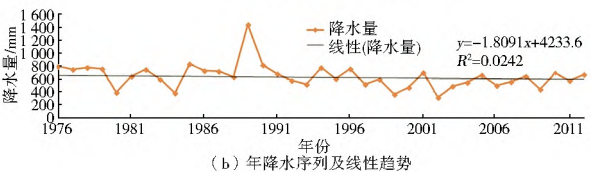
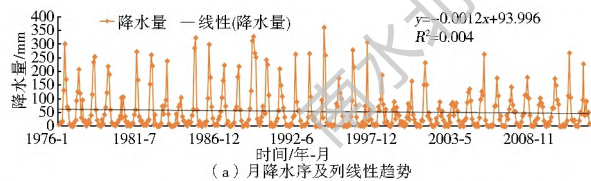


图 3 1976 年-2012 年年降水和月降水的线性趋势

Fig. 3 Linear trend of annual and monthly rainfall during 1976-2012

由图 3(a) 可看出,1976 年-2012 年月降水线性趋势线 $y = -0.0012x + 93.996$, 由于月降水周期性变化比较明显,所以导致线性拟合趋势线斜率不明显。由图 3(b) 可看出 1976 年-2012 年的年降水线性趋势线 $y = -1.8091x + 4233.6$, 与图 3(a) 的月降水线性趋势线 $y = -0.0012x + 93.996$ 相比,年降水线性趋势线的斜率更明显,即下降趋势更明显。同

样,采用线性模型来拟合提取出趋势成分,并从原始的降水序列中减去计算出的趋势项。对比年、月径流量和降水量的趋势分析后发现,1976 年-2012 年的径流、降水时间序列均呈下降趋势,但月降水时间序列在显著性水平 $\alpha=0.05$ 时,下降趋势不明显。

此外,降水的下降速率大于径流的下降速率。虽然年径流序列相较于年降水序列而言没有明显的下降趋势,但从图 4 可看出年径流的距平百分率普遍比年降水的距平百分率要大,即年径流序列的年际上下变化幅度大于年降水序列的年际上下变化幅度。由此可知,虽然潮河流域年径流和年降水的变化均为下降趋势,但两者的上下变化幅度不一致,故推断降水不是影响径流变化的唯一原因。

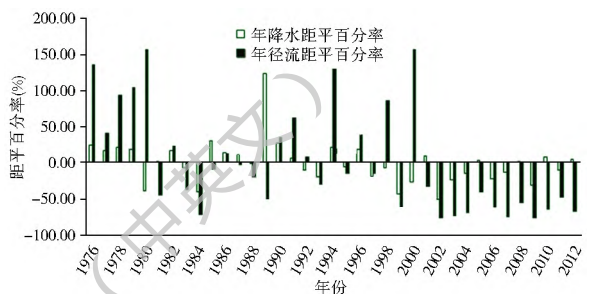


图 4 年径流和年降水的距平百分率变化

Fig. 4 Variation of anomaly percentages of annual runoff and annual rainfall

4.2 径流和降水突变成分分析

4.2.1 径流时间序列突变分析

同样,采用 Pettit 检验法识别下会站 444 个月的月径流量序列的突变性,限于篇幅,其计算过程略。对月径流量序列,1999 年 4 月时 $U_{i,T}$ 值最大,1976 年-2012 年月径流量的突变点可能在 1999 年 4 月,说明序列在 1999 年 4 月前后存在较大的差异性。 $T=437$,根据 1999 年 4 月的数据,利用式(8)计算可得 $p \leq \alpha=0.05$ 成立,可以得到 1999 年 4 月为显著变异点,序列在显著性水平 α 下发生显著突变。

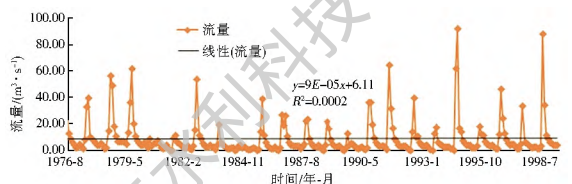


图 5 1976 年-1999 年月径流量线性趋势

Fig. 5 Linear trend of monthly runoff during 1976-1999

由图 5 和图 6 可知,1976 年-1999 年和 1999 年-2012 年的月径流量线性趋势线为 $y = -9 \times 10^{-5}x + 6.11$, $y = -6 \times 10^{-5}x + 0.43$ 。经计算 1976 年-1999 年的月径流均值为 $8.84 \text{ m}^3/\text{s}$, 1999 年-2012 年的月径流均值为 $2.92 \text{ m}^3/\text{s}$ 。采用固定突变

大小 $\delta = 2.92 - 8.84 = -5.92$ 拟合其突变项, 将其从已剔除趋势成分的时间序列中减去, 即可剔除突变成分。

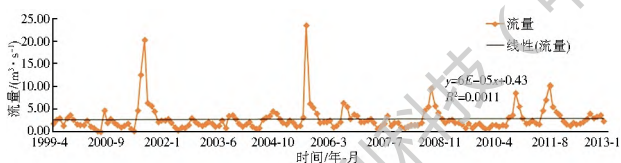


图 6 1999 年 - 2012 年月径流量线性趋势

Fig. 6 Linear trend of monthly runoff during 1999-2012

4.2.2 降水时间序列突变分析

对月降水量序列, 采用 Pettitt 检验法识别 444 个月的月降水量序列的突变性, 限于篇幅, 其计算过程省略。经计算 1991 年 10 月时 $U_{i,T}$ 值最大, 1976 年 - 1991 年的月径流均值为 $61.64 \text{ m}^3/\text{s}$, 1991 年 - 2012 年的月径流均值为 $47.18 \text{ m}^3/\text{s}$, 但 Pettitt 检验的原假设为序列无变异点, 故月降水时间序列在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下没有显著突变。采用固定突变大小 $\delta = 47.18 - 61.64 = -4.46$ 拟合其突变项, 将其从已剔除趋势成分的时间序列中减去, 即可剔除突变成分。通过对 1976 年 - 2012 年月径流时间序列和月降水时间序列的突变分析可得, 径流时间序列有明显的突变而降水时间序列没有明显的突变。进一步说明: 潮河流域年降水和年径流的变化规律不一致, 降水不是影响径流变化的唯一因素。

4.3 径流和降水周期成分分析

对剔除了趋势项和突变项之后的新的径流时间序列采用方差分析法识别 444 个月的周期成分, 其计算过程数据量较大, 在此仅列出计算结果: 月径流时间序列第一隐含周期为 2 年, 第二隐含周期为 4 年, 第三隐含周期为 3 年。同样, 对剔除了趋势项和突变项之后的新的降水时间序列采用方差分析法识别 444 个月的周期成分, 在此也仅列出计算结果: 月降水时间序列第一隐含周期为 2 年, 第二隐含周期为 15 年, 第三隐含周期为 2 年。综上所述, 月径流时间序列和月降水时间序列均存在周期成分, 但二者的主周期不一致, 再次说明径流与降水的变化状况不同, 影响径流一致性的因素还有非降水因素。

4.4 随机成分分析

潮河流域下游 1976 年 - 2012 年原始的月径流量以及月降水量序列剔除上述计算出的趋势项、突变项和周期项后, 剩余的序列即为随机成分。

4.5 计算结果分析

综上, 潮河流域 1976 年 - 2012 年共 37 年月径流量时间序列存在下降的趋势, 并在 1999 年 4 月出

现显著突变, 存在 2 年、4 年和 3 年的主周期。1976 年 - 2012 年的 444 月降水量时间序列存在下降的趋势, 且降水的下降速率大于径流的下降速率, 但径流的年际变化比降水显著。月降水量出现突变的时间是 1991 年 10 月, 存在 2 年、15 年和 2 年的主周期。说明在此期间, 潮河流域下会站的径流和降水时间序列都存在下降的趋势成分, 但二者的变化速率不同, 而其他两方面, 无论是突变点出现年月, 还是周期分布和随机成分方面, 二者都有显著的差异, 说明降水变化并不是导致潮河流域径流变化的唯一因素^[18]。计算分析过程可以看出, 月径流量和月降水量拟合的线性趋势线的斜率很小, 且由于数据的连续波动, 导致很难找到一个拟合程度很好的线性趋势线, 但年径流量和年降水量的拟合线性趋势线斜率相对明显, 变化趋势更直观。说明径流量和降水量年内波动较大, 而年际波动相对而言较小, 更易从中看出年际变化趋势^[19]。

5 人类活动对径流一致性影响

通过以上对潮河流域下游的径流和降水时间序列的趋势、突变、周期成分的对比分析, 可知径流和降水的变化情况不一致, 故降水的气候因素变化不是导致径流变化的唯一因素, 人类活动也是影响径流变化的重要因素之一。影响流域年径流的人类活动主要有两个方面: (1) 不同目的要求下的土地利用类型的改造活动, 如退耕还林、荒山造林、围湖造田等土地利用活动, 从而改变流域的土地覆被状况; (2) 水库、塘坝、沟渠等水利工程设施的修建和使用^[20]。潮河上游土地利用类型中所占面积最大的为林地, 占地面积第二、三的分别是草地和农田, 这三种土地利用类型面积总和占潮河流域总面积的 97% 以上。20 世纪 70 年代初到 80 年代中后期潮河流域的耕地面积增加了 6.50%, 林地面积增加了 7.80%; 20 世纪 80 年代中后期到 21 世纪初, 潮河流域耕地面积几乎没有变化, 而林地面积继续增长了 11.80%。从 20 世纪 70 年代初一直到 21 世纪初草地的面积一直保持减少的趋势, 且其减少的幅度大于耕地和林地相应时段的变化幅度。这些变化的主要原因是流域内水土治理生态建设工程的实施。从 20 世纪 80 年代后期开始, 潮河流域先后实施了潮白河密云水库上游国家重点水土流失治理工程、京津风沙源区防沙治沙工程、首都水资源区水土保持工程和太行山国家水土保持重点建设工程等生态和工程治理项目。这些项目的实施, 改变了潮河流域下垫面的条件与类型以及流域土地利用、覆被

类型^[21]。流域内建设的水利工程是另一种改变流域径流的重要人类活动类型,其主要用于蓄水、排水和农田灌溉。灌溉过程中会加大流域蒸发量和入渗量,进而改变流域内的水量平衡。20世纪70年代后期,随着工农业生产的快速发展,极大地提高了水利化程度,到20世纪80年代中期,大规模的水利设施、水库和塘坝设施发挥作用,对河流的水文特征的影响渐渐加大。这两种人类活动都改变了流域下垫面的条件,并控制了流域的水量平衡,进一步影响径流的时空分布和变化情况,从而使得潮河下游的径流表现出了本文的趋势、周期及突变现象。

6 结论

本文以潮河流域为研究对象,对潮河流域下游下会站的降雨和径流原始时间序列进行处理后,对其趋势、周期及突变成分和特征进行了识别和检验,展现了潮河流域径流的演变特点和规律,重点分析了径流的变化与降水的变化是否一致,进而分析人类活动及水利设施等非降水因素对径流变化的影响,得到以下结论。

(1) 潮河流域年、月径流时间序列有明显的下降趋势,发现径流量下降趋势更明显;潮河流域径流量在1999年4月有显著的突变现象;潮河流域径流量隐含有2年、4年和3年的主周期。

(2) 潮河流域月降水时间序列下降趋势不明显,而年降水时间序列的下降趋势相对明显些,且降水量在1991年10月存在突变,隐含2年、15年和2年的主周期。

(3) 通过比较径流时间序列和降水时间序列的趋势、突变、周期成分,可知径流和降水的变化情况不一致,故降水不是影响径流变化的唯一因素,而且非降水因素的人类活动(主要是土地利用类型改造、水利设施建设和水土保持及生态治理工程建设等)的干扰在20世纪90年代后期影响径流演变过程的作用较大。

综上,未来的短时间内潮河流域径流量将会继续保持衰减的状态,也说明潮河流域水文系统是一个确定性和不确定性因素共同作用下的辩证统一、相互依存的整体。

参考文献(References):

[1] 王冰. 水库防洪风险评估及水文序列变异影响的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012, 73-74. (WANG Bing. Study on the risk evaluation of the reservoir flood control and the influence of the changes in hydrological series[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012, 73-74. (in Chinese))

[2] 刘春蓁. 自然气候变异与人为气候变化对径流影响研究进展[J]. 气候变化研究进展. 2008, 4(3): 133-139. (LIU Chunzhen. Advances in studying impacts of natural climate variability and anthropogenic climate change on streamflow[J]. Advances in Climate Change Research, 2008, 4(3): 133-139. (in Chinese))

[3] A. Chavez Jimenez, B. Lama, L. Garrote. Characterisation of the sensitivity of water resources systems to climate change[J]. Water Resources Management, 2013, 27(12): 4237-4258.

[4] 孙宁, 李秀彬, 冉圣洪, 等. 潮河上游降水-径流关系演变及人类活动的影响分析[J]. 地理科学进展, 2007, 26(5): 41-47. (SUN Ning, LI Xiubin, RAN Shenghong, et al. The changes of rainfall-runoff relationship and the impacts of human activities in the upper Chao watershed[J]. Progress in Geography, 2007, 26(5): 41-47. (in Chinese))

[5] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 应用SWAT模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J]. 生态学报. 2014, 34(6): 1559-1567. (GUO Juntong, ZHANG Zhiqiang, WANG Shengping, et al. Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1559-1567. (in Chinese))

[6] 李子君, 李秀彬. 近45年来降水变化和人类活动对潮河流域年径流量的影响[J]. 地理科学, 2008, 28(6): 809-813. (LI Zijun, LI Xiubin. Impacts of precipitation changes and human activities on annual runoff of Chao river basin during past 45 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(6): 809-813. (in Chinese))

[7] 张淑兰, 王彦辉, 于澎涛, 等. 定量区分人类活动和降水量变化对泾河上游径流变化的影响[J]. 水土保持学报. 2010, 24(4): 53-58. (ZHANG Shulan, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al. Study for separating the impact of precipitation variation and human activities on runoff change of the upper reaches of Jing River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 53-58. (in Chinese))

[8] 张伟丽. 气候变化和人类活动对永定河流域径流的影响[J]. 人民黄河. 2015, 37(5): 27-29. (ZHANG Weili. Effects of climate change and human activities on runoff in the Yongding River Basin[J]. Yellow River, 2015, 37(5): 27-29. (in Chinese))

[9] 刘睿, 夏军. 气候变化和人类活动对淮河上游径流影响分析[J]. 人民黄河. 2013, 35(9): 30-33. (LIU Rui, XIA Jun. Influence analysis of climate change and human activities on runoff of the upper Huaihe River[J]. Yellow River, 2013, 35(9): 30-33. (in Chinese))

[10] Yuzhen Zhang, Zhijun Yan, Haitao Zhao. Water production change Analysis for River Basins Water Network under Influence of Human Activities[J]. Journal of Water Resources Research, 2015, 4(4): 353-359.

[11] 刘东征. 湘江流域水资源演变规律研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007. (Liu Dongzheng. The Research on Evolution Law Of Water Resource In Xiang River Basin[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2007. (in Chinese))

- nese)
- [12] 张悦, 李国芳. 长江口潮位非一致性及对水文设计的影响研究[J]. 长江科学院院报, 2015(5): 21-27. (ZHANG Yue, LI Guo fang. Nonstationarity of tidal level and its impacts on hydrologic design in Yangtze River estuary [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015(5): 21-27. (in Chinese))
- [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 Ai jing. Research on the streamflow responses to climate variability and human activities in Northeast China [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [14] 李鹏. 汾河上游径流时间序列成分分析和特性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012. (LI Peng. The analysis of components and research of characteristic for time series of runoff in the upstream of the Fenhe River [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [15] 周石清, 陈建江, 耿峻岭. 单因素方差分析法对三屯河年均流量序列的周期分析[J]. 新疆水利, 2001(03): 25-29. (ZHOU Shi qing, CHEN Jian jiang, GENG Jun ling. Periodicity analysis of the annual runoff series for San Tun He by one way analysis of variance [J]. Xinjiang Water Resources, 2001(03): 25-29. (in Chinese))
- [16] 刘茵, 汪妮, 罗军刚. 面向不平稳径流序列的中长期径流预测方法[J]. 人民黄河, 2014(5): 15-18. (LIU Yin, WANG Ni, LUO Jun gang. A long term runoff forecast method facing unsteadily runoff sequence [J]. Yellow River, 2014(5): 15-18. (in Chinese))
- [17] 郑江坤. 潮白河流域生态水文过程对人类活动/气候变化的动态响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2011. (ZHENG Jiangkun. Dynamic response of eco hydrological process to human activities and climate change in Chaobai River Basin [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. (in Chinese))
- [18] 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(02): 55-58. (WANG Guo qing, ZHANG Jian yun, LIU Jiu fu, et al. Quantitative assessment for climate change and human activities impact on river runoff [J]. China Water Resources, 2008(02): 55-58. (in Chinese))
- [19] 李林, 王振宇, 秦宇生, 等. 长江上游径流量变化及其与影响因素关系分析[J]. 自然资源学报, 2004(6): 694-700. (LI Lin, WANG Zhen yu, QIN Yu sheng, et al. Analysis of the relationship between runoff amount and its impacting factor in the upper Yangtze River [J]. Journal of Natural Resources, 2004(6): 694-700. (in Chinese))
- [20] 袁喆, 杨志勇, 董国强. 近 47 年来降水变化和人类活动对滦河流域年径流量的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2012(04): 66-69+80. (YUAN Zhe, YANG Zhi yong, DONG Guo qiang. Impacts of precipitation changes and human activities on annual runoff in the Luanhe river basin during recent 47 years [J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012(04): 66-69+80. (in Chinese))
- [21] 姚安坤, 张志强, 郭军庭, 等. 北京密云水库上游潮河流域土地利用/覆被变化研究[J]. 水土保持研究, 2013(02): 53-59. (YAO An kun, ZHANG Zhi qiang, GUO Jun ting, et al. Study on land use/cover changes in Chaohe River Basin in the headwaters of miyun reservoir in Beijing [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013(02): 53-59. (in Chinese))