



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.05.006

王豪杰, 左其亭, 罗增良. 沙颍河代表站径流演变特征及归因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 36-42. WANG Haojie, ZUO Qitong, LUO Zengliang. Runoff evolution characteristics of a typical station in Shayinghe River basin and attribution analysis[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 36-42. (in Chinese)

沙颍河代表站径流演变特征及归因分析

王豪杰¹, 左其亭^{1,2}, 罗增良¹

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学 水科学研究中心, 郑州 450001)

摘要: 径流演变特征研究可为在变化环境下制定流域水资源规划、建立流域水文响应机制提供科学依据。以沙颍河流域代表水文站阜阳站为例, 运用M-K检验法和小波分析法分析了1956年-2011年径流变化特征, 并从气候变化及人类活动的角度分析了径流变化的主要驱动因素。结果表明: 沙颍河阜阳站径流总体呈下降趋势, 但下降趋势不明显, 总体未达到95%显著性水平; 在1966年前后存在明显的突变点; 径流存在13 a、26 a两类周期变化特性, 周期演变过程受人类活动影响显著。就驱动因素而言, 人类活动对径流变化的贡献率在65%以上, 气候变化对径流变化的影响较弱, 表现为从负向到正向的趋势。

关键词: 径流演变; 气候变化; 人类活动; 蒸发率函数; 阜阳站

中图分类号: P333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)05-0036-07

Runoff evolution characteristics of a typical station in Shayinghe River basin and attribution analysis

WANG Haojie¹, ZUO Qitong^{1,2}, LUO Zengliang¹

(1. School of Water Conservancy & Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Center for Water Science Research, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The study on the characteristics of runoff evolution can provide a scientific basis for the development of water resources plans and establishment of hydrological response mechanisms. In this study, the runoff evolution characteristics of Fuyang station were analyzed using M-K test and wavelet analysis based on the discharge data of Fuyang hydrometric station from 1956 to 2011, and the main factors influencing the runoff changes were analyzed from the perspective of climate change and human activities. The results showed that the runoff of Fuyang station of Shayinghe River decreased but the decreasing trend was not significant, not reaching the 95% significance level. An abrupt change occurred around 1966. There was a 13-year periodic variation and a 26-year periodic variation of the runoff, and the periodic evolution process was affected by human activities significantly. As for the driving factors, the contribution rate of human activities to runoff changes was more than 65%. The impact of climate change on runoff changes was relatively weak, and tended to turn from negative to positive.

Key words: runoff evolution; climate change; human activities; evaporation rate function; Fuyang station

近几十年来随着工业社会的迅速发展和人类活动的快速扩张, 自然环境受人类活动的影响日益加

深, 全球气候也随之发生剧烈变化^[1]。全球性的气候变化和人类对水资源利用程度的逐渐加深, 对水

收稿日期: 2016-12-12 修回日期: 2017-03-15 网络出版时间: 2017-08-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170829.1915.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51279183; 51509222); 郑州大学重大科技项目培育基金(2015ZDPY01)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51279183; 51509222); Major Science and Technology Project of Zhengzhou University (2015ZDPY01)

作者简介: 王豪杰(1994), 男, 河南商丘人, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: 1143743304@qq.com

通讯作者: 左其亭(1967), 男, 河南固始人, 教授, 博士, 长期从事水文学及水资源研究。E-mail: zuoqt@zzu.edu.cn

文过程产生较大影响,尤其对水资源的形成和转化产生直接影响^[2],因此变化环境下的水文过程分析在国际水文研究中备受关注^[3-6]。气候变化通过影响区域内降水和温度等气象因素对水文过程产生影响,人类活动对水文过程的影响则主要表现在下垫面性质变化导致的蒸发、入渗及产汇流等过程的改变^[7-10]。在分析二者对径流影响的过程中,常用的方法包括弹性分析法^[11]、水热平衡分析法^[12]、线性分析法^[13]、COPULA 函数法^[14]等。

淮河流域是我国人口密度最大的流域之一,沙颍河是淮河最大的支流^[15]。自 20 世纪 60 年代以来,人类在沙颍河流域的取用水活动逐渐增强,并修建了大量水利设施以满足社会发展^[16],径流过程受日益增长的人类活动的影响。此外,沙颍河径流演变过程也受到气候变化带来的影响。但目前对沙颍河流域径流的研究,主要集中在河流水质污染及径流特性方面^[17-18],缺乏气候变化及人类活动对其演变特征影响机制的分析。本文选取沙颍河流域重要控制站点——阜阳站为代表站,采用 1956 年—2011 年流量数据,运用 M-K 检验、小波分析法,对阜阳站径流演变趋势、径流突变及周期变化特征进行分析,并采用阜阳气象站气象数据,结合 P-M 公式,计算阜阳站潜在蒸发量,从气候变化及人类活动的角度分析径流演变过程及二者的贡献率。

1 研究区概况

沙颍河发源于河南嵩山地区,在阜阳市沫河口流入淮河,以颍河为源全长共 543.21 km^[19],流域面积 39 075.30 km²。降水量年际及年内分布不均,年际降水量变化大,易呈现连涝或连旱现象。径流形式主要为雨洪型。

阜阳水文站位于阜阳市三里湾,控制面积 35 246 km²,是沙颍河流域重要的控制性站点,能直观反映流域径流的演变趋势,此外,水文站位于沙颍河下游平原区,所控制流域是人类活动较强的区域之一,径流过程同时受气候变化和人类活动的影响。基于上述考虑,选取阜阳站作为沙颍河流域代表站,研究其径流演变特征,并从人类活动和气候变化的角度对其驱动因素进行分析。

2 方法与数据

2.1 研究思路

运用 M-K 检验以及小波分析法对阜阳站径流演变特征进行分析;在此基础上,确定径流受人类活

动影响较弱的时期作为基准期,根据水量平衡原理和 P-M 公式计算阜阳站基准期的实际蒸发量和潜在蒸发量,通过蒸发率函数确定地区特征参数 ω 、 β 、 γ ;将基准期之后的研究期以 10 年为单位划分时段,根据阜阳站气象资料,分别计算各时段的潜在蒸发量,分析降水、潜在蒸发量变化情况以及对径流的影响;计算气候变化和人类活动分别引起的径流变化量,并分析二者对径流变化的贡献。

2.2 研究方法

(1) 径流演变特征分析。

Manr Kendall 检验。在水文序列的时变性分析过程中,M-K 检验是一项被普遍应用的非参数检验工具^[21-22]。该方法对水文序列数据的要求较低,计算较简便,可适用于降水、径流、气温等水文要素的长序列趋势分析。通过 M-K 检验,可以分析水文序列的长期发展趋势,得出水文序列的突变性以及突变时间。

小波分析。在水文分析中,小波分析主要应用于水文过程的多时间尺度和周期变化分析^[23-24],能客观定量地得出数据序列中隐藏的多种周期性变化,并可以对数据序列局部进行细化分析,以得出长序列内部的周期变化规律。

(2) 径流影响因素识别。

气候变化可引起降水、气温、风速等气象因素的变化,导致水文循环过程发生变化,通过影响降水和蒸发情况,进而影响地区的水量平衡状态。对阜阳地区而言,水量平衡可以表示为:

$$R = P - E + \Delta S \quad (1)$$

式中: R 为径流量; P 为降水量; E 为阜阳实际蒸发量; ΔS 为区域水量变化量。在长期自然计算条件下, ΔS 可近似为 0。

在水量收支平衡的基础上,Zhang^[25] 等认为,在一个较长的时期内,区域多年平均实际蒸散发量与年平均降水量、流域潜在蒸发量和植被水分利用能力有密切的关系,并基于全球超过 250 个地区的分析结果,提出了如下蒸发率函数:

$$\frac{E}{P} = \frac{1 + \omega \left(\frac{E_0}{P} \right)}{1 + \omega \left(\frac{E_0}{P} \right) + \left(\frac{E_0}{P} \right)^{-1}} \quad (2)$$

式中: E_0 为潜在蒸发量; ω 为植被水分利用能力,表示区域森林覆盖状况对函数的影响程度。

自 20 世纪 60 年代以来,随着人类活动的扩张,阜阳市水资源的消耗也随之大幅增长。选取阜阳站受人类活动影响较小的时期,通过水量平衡方程推

导该时期的实际蒸发量, 并通过 P-M 公式^[26] 推求逐日潜在蒸发量, 累加得到年潜在蒸发量。使用蒸发率函数确定区域植被水分利用能力 ω 。

P-M 公式计算形式如下:

$$E_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u)} \quad (3)$$

式中: R_n 为太阳净辐射; G 表示土壤热通量, 在长时期计算时可近似认为等于 0; T_{mean} 为日平均温度; u 为 2 m 高度风速; e_s 为平均饱和水汽压; e_a 为实际水汽压; Δ 为气压曲线斜率; γ 为干湿常数。

在区域水量平衡过程中, P 和 E_0 的变化可使径流产生相应变化。使用 P 和 E_0 分析气候变化引起的径流变化, 气候变化引起的多年平均径流变化量可表示为^[27]:

$$\Delta R_c = \beta \Delta P + \gamma \Delta E_0 \quad (4)$$

$$\text{其中: } \beta = \frac{1 + 2x + 3\omega x}{(1 + x + \omega x^2)^2}, \quad \gamma = \frac{1 + 2\omega x}{(1 + x + \omega x^2)^2},$$

$$x = \frac{E_0}{P}$$

式中: ΔR_c 为气候变化引起的径流变化量; ΔP 为降水变化量; ΔE_0 为潜在蒸发量变化量; β 和 γ 分别为研究区内径流对 P 和 E_0 的敏感性参数; x 为干旱系数。

对特定研究区而言, 径流受气候因素及人为因素的综合影响。流域实测径流变化量可由水文站实测数据计算得出, 因此, 人类活动引起的径流变化量为:

$$\Delta R_h = \Delta R_o - \Delta R_c \quad (5)$$

式中: ΔR_h 为人类活动引起的径流变化量; ΔR_o 为实测径流变化量。

2.3 数据来源

采用沙颍河流域代表水文站阜阳站 1956 年-2011 年的实测流量数据, 并进行径流化处理, 以表示测站断面以上的流域径流深^[14]。实测流量数据进行径流化处理的计算公式如下:

$$R = \frac{Q \Delta t}{1000F} \quad (6)$$

式中: R 为径流量; Q 为实测流量; Δt 为相邻两次流量测量的时间间隔; F 为测站断面以上的控制流域面积。

气象数据同样采用 1956 年-2011 年阜阳气象站每日记录资料, 包括风速、气温(最低、最高、平均)、日降水量、大气压以及平均水汽压等。另外, 由于阜阳气象站缺少太阳净辐射数据, 考虑到阜阳与合肥经纬度相近, 因此采用合肥市太阳净辐射数据

代替计算。

3 阜阳站径流演变特征

3.1 径流趋势变化

根据沙颍河流域阜阳站 1956 年-2011 年径流序列数据, 运用趋势线分析和 M-K 秩次相关检验法分析阜阳站径流的变化情况, 见图 1。

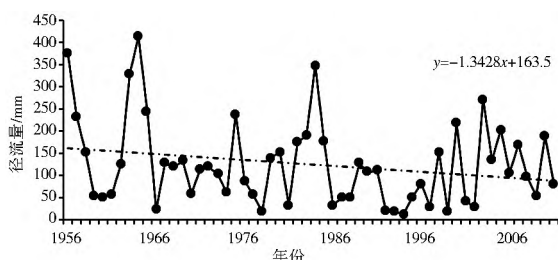


图 1 阜阳站径流变化趋势

Fig. 1 Long term trend of runoff at Fuyang station

由图 1 可知, 沙颍河阜阳站年径流量在研究期内呈下降趋势, 径流平均线性递减率为 1.34 mm/year。径流年际分布不均匀, 年平均径流量最大值为 414.0 mm, 最小值仅 18.3 mm, 径流极端值出现频繁。1956 年-1965 年径流量较大, 时段内年平均径流量为 204.1 mm, 且存在明显的丰枯交替现象。1965 年以后年径流量明显减小, 丰枯交替现象减弱, 与从该时期起人类活动逐渐增强和流域内各类水利工程调度运行影响一致。根据 M-K 趋势检验值 $Z = -1.42$, 同样表明阜阳站径流序列呈下降趋势, 满足 90% 置信水平, 但未达到 95% 显著性水平。

3.2 径流突变特征

在分析沙颍河阜阳站径流趋势的基础上, 应用 M-K 检验法分析其突变特征, 如图 2。

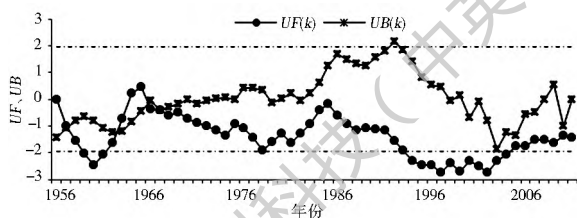


图 2 阜阳站径流突变点

Fig. 2 Abrupt change point of runoff at Fuyang station

由 UF 曲线可知, 沙颍河阜阳站径流量呈下降趋势, UF 和 UB 两条曲线在 1957 年-1966 年产生了多个交点, 这是由于沙颍河流域在该时期内大量修建水利工程, 其截流和取水过程使流域内径流发生剧烈的变化, 进而影响阜阳站径流也发生相应的变化。其中, 白龟山水库 1966 年全面建成, 总库容 9.22 亿 m^3 ; 昭平台水库总库容 7.13 亿 m^3 , 1959 年

建成部分土建工程,1964年由于河道严重冲刷,造成沙河改道,严重影响了沙颍河下游阜阳站径流过程。因此,确定径流序列在1966年发生突变,1993年-2004年下降趋势达到95%显著性水平。总体下降趋势与M-K秩次相关检验分析一致,未达到95%显著性水平。

3.3 径流周期变化

采用小波分析方法对沙颍河阜阳站径流周期变化特性进行分析,并使用Matlab工具绘制小波变换系数实部分布图和方差图,见图3、图4。

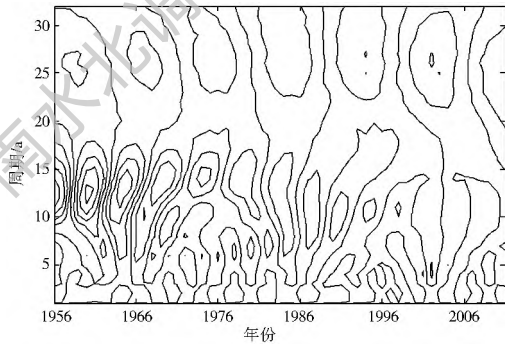


图3 小波变换系数实部分布图

Fig. 3 Distribution of the real part of wavelet transform coefficient

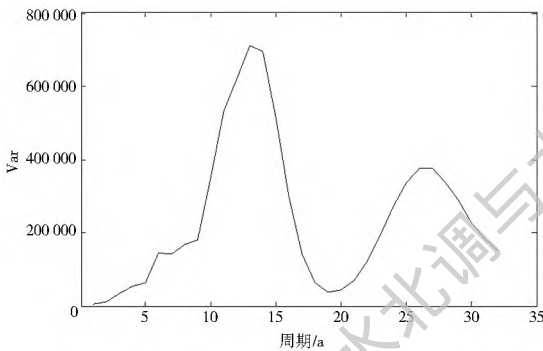


图4 小波变换方差

Fig. 4 Wavelet transform variance

根据实部分布图和方差图,可知阜阳站径流呈现出明显的多时间变化特征,存在13a、26a两类周期变化特征,13a周期变化对径流序列的方差贡献最大,是径流演变的第一主周期,26a周期变化为第二周期。

绘制小波系数模方分布图,如图5。对径流序列中各存在周期的能量大小进行分析可知,13a周期的能量最强,周期最显著,但在时间尺度上从20世纪60年代后期开始发生衰减,并在1980年前基本消失,转为26a的周期特性;26a径流变化周期在13a周期发生衰减的同时开始出现,周期显著性较弱,但分布时间均匀,一直持续到研究期结束,表现为稳定发生趋势。这一现象的出现一方面是由于从该时期开始,阜阳地区人类活动逐渐增强,对径流

周期演变的影响逐渐加深;另一方面是由于该时期沙颍河流域大量修建水利工程,对流域内水文过程造成了较大的影响,使沙颍河阜阳站径流特性发生了较大改变。

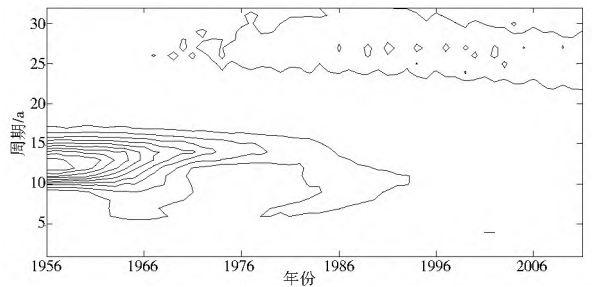


图5 小波系数模方分布图

Fig. 5 Distribution of modulus square of wavelet transform coefficient

4 阜阳站径流演变驱动因素贡献分析

径流演变驱动因素分为自然因素和人为因素。其中自然因素包括降水、气温、水汽压、太阳辐射等要素的影响,而潜在蒸发量是对区域内除降水外各气象要素的综合反映。径流演变过程中,降水量增加可通过产汇流过程引起径流量增加,而潜在蒸发量的上升可增加实际蒸散发量,进而引起径流量减少。

本文分析的人为因素主要表现为人类的取用水活动和水利工程对径流产生的影响作用,是阜阳地区人类生活、工业、农业用水以及流域内各类水利工程建设运行影响的综合体现。

4.1 降水及潜在蒸发量变化分析

(1) 降水变化分析。

根据阜阳气象站降水数据绘制年降水量趋势分析图,见图6。可知阜阳站降水量在20世纪60和70年代相对较少,80年代之后降水量相对上升,在长时期内呈现轻微上升趋势。另外,90年代后,降水极值出现频率与前期相比有增大的趋势。总体而言,沙颍河阜阳站降水量受气候影响呈轻微上升趋势,90年代之后受全球气候变暖影响,降水量年际波动变大。

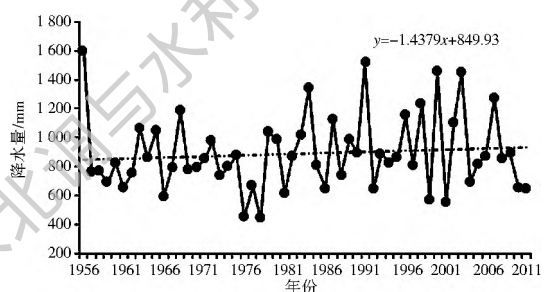


图6 阜阳站降水量趋势分析

Fig. 6 Long-term trend of precipitation at Fuyang station

(2) 潜在蒸发量变化分析。

根据阜阳气象站 1956 年- 2011 年数据, 计算逐日潜在蒸发量, 进行累加计算得阜阳站历年潜在蒸发量, 绘制趋势分析图, 如图 7。并结合 M-K 趋势检验值 $Z = -2.65$, 可知阜阳站潜在蒸发量总体有显著下降趋势, 满足 99% 显著性水平。对潜在蒸发量序列做 M-K 突变分析, 并绘制潜在蒸发量突变趋势如图 8。可知沙颍河阜阳站潜在蒸发量在 1974 年发生突变, 突变前 $UF(k) > 0$, 潜在蒸发量呈上升趋势。突变点后的 $UF(k) < 0$, 潜在蒸发量开始呈现下降趋势, 并在 1983 年之后达到 95% 显著性水平。

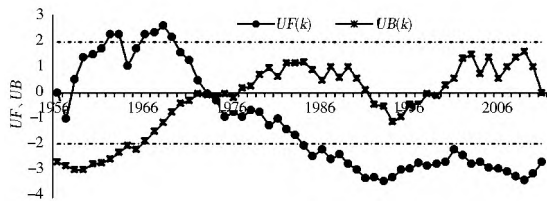


图 8 阜阳站潜在蒸发量突变点
Fig. 8 Abrupt change point of potential evapotranspiration at Fuyang station

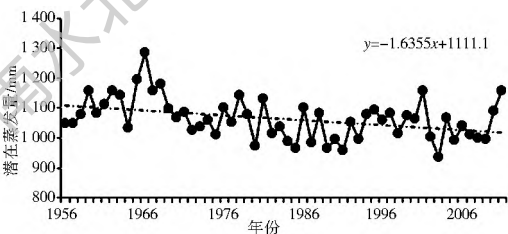


图 7 阜阳站潜在蒸发量变化趋势
Fig. 7 Long term trend of potential evapotranspiration at Fuyang station

4.2 径流演变驱动因素贡献率

沙颍河阜阳站径流量在 1966 年发生突变, 在突变年发生之前, 人类活动对径流的影响较弱, 因此采用 1956 年- 1965 年为基准年, 以 10 年为单位划分研究时段, 分析基准期之后各时段径流变化情况。采用基准期阜阳站实测水文气象数据, 根据蒸发率函数率定参数。率定得植被水分利用能力 $\omega = 1.478$ 。并计算得出阜阳地区径流敏感性参数 $\beta = 0.451$, $\gamma = -0.235$ 。在此基础上, 根据公式(4) 计算二者对沙颍河阜阳站各时段径流变化的影响分量和贡献率 η_c 和 η_h , 结果见表 1。

表 1 气候变化和人类活动对阜阳站径流变化影响分量

Tab. 1 Contribution of climate change and human activities to runoff variation at Fuyang station

年份	R/mm	P/mm	E_0/mm	$\Delta R_c/\text{mm}$	$\Delta R_h/\text{mm}$	$\Delta R_t/\text{mm}$	$\eta_c(\%)$	$\eta_h(\%)$
1956- 1965	204.1	904.5	1106.0					
1966- 1975	110.6	840.2	1100.7	- 93.4	- 27.8	- 65.6	29.75	70.25
1976- 1985	138.3	824.7	1048.1	- 65.7	- 22.4	- 43.3	34.14	65.86
1986- 1995	59.2	915.5	1030.6	- 144.8	22.7	- 167.5	11.92	88.08
1996- 2005	119.0	903.9	1045.5	- 85.1	13.9	- 99.0	12.33	87.67
2006- 2011	116.8	867.2	1050.1	- 87.2	- 3.8	- 83.5	4.30	95.70

由表 1 计算结果可以看出, 人类活动对径流量变化的贡献率在各时期均在 65% 以上, 在 2006 年- 2011 年达到 95% 以上, 是沙颍河阜阳站径流量变化的主要影响因素。从对径流量的影响大小来看, 在 1986 年- 1995 年达到最大, 相比基准期, 径流量降低了 167.5 mm, 贡献率为 88.08%; 1995 年以后人类活动影响大小逐渐减弱, 但由于气候变化对径流的影响也同时减弱, 人类活动贡献率反而增加, 并于 2006 年- 2011 年达到 95% 的最大贡献率。气候变化对径流量的贡献率则逐渐减弱, 1976 年- 1985 年最大为 34.14%, 2006 年- 2011 年最小, 仅为 4.3%。影响模式则表现为从负向到正向的趋势, 这种模式与阜阳当地气候的变化情况密切相关。根据对沙颍河阜阳站降水量和潜在蒸发量的趋势分析可以看出, 和基准期相比, 降水量在 1966 年- 1985 年相对较低, 1985 年后逐渐上升, 对径流量影响表现

为从减少作用向增加作用转变。潜在蒸发量在 1974 年左右产生突变, 突变前呈上升趋势, 之后逐渐下降, 并在 1983 年之后达到 95% 显著性水平。而潜在蒸发量与径流量变化呈负相关。因此, 根据降水和潜在蒸发量的综合分析结果, 阜阳站气候变化在 1966 年- 1985 年对径流影响表现为减少作用, 在 1985 年之后表现为增大作用。

5 结论

本文以沙颍河阜阳站为代表站, 基于 M-K 检验方法和小波分析法, 分析沙颍河阜阳站径流演变特性, 并根据蒸发率函数, 从气候变化及人类活动的角度, 分析阜阳站径流变化情况, 主要结论如下。

(1) 沙颍河阜阳站径流总体呈现下降趋势, 但下降趋势不明显, M-K 检验结果显示, 径流在 1993 年- 2004 年下降趋势达到显著性水平, 总体下降趋势

则未达到统计意义显著水平; 径流序列在 1966 年前后存在明显突变点; 存在 13 a、26 a 两类演变周期, 且周期演变进程受人类活动尤其是水利工程修建影响显著。

(2) 在径流变化过程中, 人类活动始终起着负向减流作用, 对径流变化的贡献率在 65% 以上。影响量大小呈现先增后减趋势, 说明随着社会发展, 人类对水资源的利用程度逐渐加深, 利用方式则表现为逐渐从无节制的利用方式向可持续利用的方式转变。而气候变化对径流的影响相对较弱, 且呈现先负面减流后增大径流的趋势。

参考文献(References):

- [1] 张强, 韩永翔, 宋连春. 全球气候变化及其影响因素研究进展综述[J]. 地球科学进展, 2005(9): 990-998. (ZHANG Qiang, HAN Yong-xiang, SONG Lian-chun. The summarize of development of global climate change and its effect factors[J]. Advance in Earth Sciences, 2005(9): 990-998. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.2005.09.009
- [2] 李峰平, 章光新, 董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J]. 地理科学, 2013(4): 457-464. (LI Feng-ping, ZHANG Guang-xin, DONG Li-qin. Studies for impact of climate change on hydrology and water resources[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013(4): 457-464. (in Chinese)) DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2013.04.012
- [3] Khadka D, Babel M S, Shrestha S, et al. Climate Change Impact on Glacier and Snow Melt and Runoff in Tamakoshi Basin in the Hindu Kush Himalayan (HKH) Region[J]. Journal of Hydrology, 2014, 511: 49-60. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.01.005
- [4] 张光辉. 全球气候变化对黄河流域天然径流量影响的情景分析[J]. 地理研究, 2006(2): 268-275. (ZHANG Guang-hui. Analysis on potential effects of global climate change on natural runoff in the Yellow River Basin[J]. Geographical Research, 2006(2): 268-275. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2006.02.010
- [5] 党素珍, 董国涛, 蒋晓辉, 等. 气候变化和人类活动对泾河上游径流的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 30-34. (DANG Su-zhen, DONG Guo-tao, JIANG Xiao-hui, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff in the upper reaches of Jinghe River[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 30-34. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdk.2014.04.007
- [6] 刘艳丽, 张建云, 王国庆, 等. 环境变化对流域水文水资源的影响评估及不确定性研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2015(2): 102-110. (LIU Yan-li, ZHANG Jian-yun, WANG Guo-qing, et al. Review for impacts assessment of environmental change on hydrology and water resources and uncertainty in catchment scale[J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis, 2015(2): 102-110. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2015.02.004
- [7] 曹丽娟, 董文杰, 张勇, 等. 未来气候变化对黄河流域水文过程的影响[J]. 气候与环境研究, 2013(6): 746-756. (CAO Li-juan, DONG Wen-jie, ZHANG Yong, et al. Impacts of climate change on hydrological processes over the Yellow River Basin[J]. Climatic and Environmental Research, 2013(6): 746-756. (in Chinese)) DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12071
- [8] 刘春蓁, 占车生, 夏军, 等. 关于气候变化与人类活动对径流影响研究的评述[J]. 水利学报, 2014(4): 379-385. (LIU Chun-zhen, ZHAN Che-sheng, XIA Jun, et al. Review on the influences of climate change and human activities on runoff[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014(4): 379-385. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.04.001
- [9] 董国强, 杨志勇, 于赢东. 下垫面变化对流域产汇流影响研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(3): 111-117. (DONG Guo-qiang, YANG Zhi-yong, YU Ying-dong. Research progress on effects of variations of underlying surface on runoff yield and concentration in the river basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(3): 111-117. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.03111
- [10] 杨舒媛, 严登华, 李扬, 等. 金沙江中上游下垫面变化的水文过程响应[J]. 人民长江, 2008(15): 39-41. (YANG Shu-yuan, YAN Deng-hua, LI Yang, et al. Hydrologic process response to underlying surface variation in middle and upper stream of the Jinsha River[J]. Yangtze River, 2008(15): 39-41. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2008.15.006
- [11] 张树磊, 杨大文, 杨汉波, 等. 1960年-2010年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J]. 水科学进展, 2015, 26(5): 605-613. (ZHANG Shu-lei, YANG Da-wen, YANG Han-bo, et al. Analysis of the dominant causes for runoff reduction in five major basins over China during 1960-2010[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(5): 605-613. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.05.001
- [12] 杨大文, 张树磊, 徐翔宇. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2015(10): 1024-1034. (YANG Da-wen, ZHANG Shu-lei, XU Xiang-yu. Attribution analysis for runoff decline in Yellow River Basin during past fifty years based on Budyko Hypothesis[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2015(10): 1024-1034. (in Chinese)) DOI: 10.1360/N092015-00013
- [13] 王西琴, 张远, 张艳会. 渭河上游天然径流变化及其自然与人为因素影响贡献量[J]. 自然资源学报, 2006(6): 981-990. (WANG Xi-qin, ZHANG Yuan, ZHANG Yan-hui. Change of natural runoff and contribution of the natural and artificial factors to the upper reaches of Wei River[J]. Journal of Natural Resources, 2006(6): 981-990. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-3037.2006.06.016
- [14] 张修宇, 左其享. 变化环境下塔里木河流域径流序列变化特征及成因分析[J]. 水利水电技术, 2013(10): 6-12. (ZHANG Xiu-yu, ZUO Qi-xiang. Analysis on changing characteristics and causation of runoff series of Tarim River Basin under varying environment[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013(10): 6-12. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0860.2013.10.002

- [15] 钟明, 万云, 万安, 等. 沙颍河流域沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 生态学杂志, 2016(7): 1857-1864. (ZHONG Ming, WAN Yun, WAN An, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Shaying River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016(7): 1857-1864. (in Chinese)) DOI: 10.13292/j.1000-4890.201607.008
- [16] 张多纯, 张幼宽. 城镇化和闸坝对沙颍河流量的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 6-10. (ZHANG Duochun, ZHANG Youkuan. Impacts of urbanization and dams on river runoff in the Shaying River Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 6-10. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nbsdqk.2014.04.002
- [17] 李冬锋, 左其亭. 重污染河流闸坝作用分析及调控策略研究[J]. 人民黄河, 2014(8): 87-90. (LI Dongfeng, ZUO Qiting. Effect simulation and regulation strategy of dam on heavily polluted rivers[J]. Yellow River, 2014(8): 87-90. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2014.08.026
- [18] 褚金庭. 沙颍河流量和水质对淮河污染的影响[J]. 水资源保护, 2001(3): 4-7. (CHU Jinting. Influence of flow rate and water quality of Shayinghe River on water quality in Huaihe River[J]. Water Resources Protection, 2001(3): 4-7. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2001.03.002
- [19] 左其亭, 罗增良, 石永强, 等. 沙颍河流域主要参数与地理特征[J]. 水利水电技术, 2016(12): 110-116. (ZUO Qiting, LUO Zengliang, SHI Yongqiang, et al. Main parameters and physiographic characteristics of Shaying River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016(12): 110-116. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2016.12.000
- [20] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013(5): 1068-1076. (SHEN Yongping, WANG Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013(5): 1068-1076. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0120
- [21] 叶磊, 周建中, 曾小凡, 等. 水文多变量趋势分析的应用研究[J]. 水文, 2014(6): 33-39. (YE Lei, ZHOU Jianzhong, ZENG Xiaofan, et al. Application of hydrological multivariate trend analysis[J]. Journal of China Hydrology, 2014(6): 33-39. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2014.06.006
- [22] 章诞武, 丛振涛, 倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J]. 水科学进展, 2013(4): 490-496. (ZHANG Danwu, CONG Zhen tao, NI Guangheng. Comparison of three Mann-Kendall methods based on the China's meteorological data[J]. Advances in Water Science, 2013(4): 490-496. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2013.04.019
- [23] 桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望[J]. 地理科学进展, 2013(9): 1413-1422. (SANG Yanfang, WANG Zhonggen, LIU Changming. Applications of Wavelet Analysis to Hydrology: Status and Prospects[J]. Progress in Geography, 2013(9): 1413-1422. (in Chinese)) DOI: 10.11820/dlkxjz.2013.09.011
- [24] 王文圣, 丁晶, 向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. 水科学进展, 2002(4): 515-520. (WANG Wen sheng, DING Jing, XIANG Honglian. Application and prospect of wavelet analysis in hydrology[J]. Advances in Water Science, 2002(4): 515-520. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2002.04.021
- [25] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. The Response of Mean Annual Evapotranspiration to Vegetation Changes at Catchment Scale[J]. Water Resources Management, 2001, 37: 701-708. DOI: 10.1029/2000WR900325
- [26] 孙福宝, 杨大文, 刘志雨, 等. 基于 Budyko 假设的黄河流域水热耦合平衡规律研究[J]. 水利学报, 2007(4): 409-416. (SUN Furbao, YANG Dawen, LIU Zhiyu, et al. Study on coupled water energy balance in Yellow River Basin based on Budyko hypothesis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(4): 409-416. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2007.04.005
- [27] Koster R D, Suarez M J. A Simple Framework for Examining the Interannual Variability of Land Surface Moisture Fluxes[J]. Journal of Climate, 1999, 12: 1911-1917. DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<1911:ASFFET>2.0.CO;2

(上接第 35 页)

- [40] Jyrkama M I, Sykes J F. The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed (Ontario) [J]. Journal of Hydrology, 2007, 338: 237-250. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.02.036.
- [41] 河北省土壤普查办公室. 河北省第二次土壤普查数据集[R]. 1991. (Department of Soil Survey in Hebei. Data set of the Second Soil survey in Hebei[R]. 1991. (in Chinese))
- [42] 丁鼎治, 李顺, 王壮图, 等. 河北土种志[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1992. (DING Dingzhi, LI Shun, WANG Zhuangtu, et al. Soil type in Hebei[M]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Press, 1992. (in Chinese))
- [43] 靳孟贵, 汪丙国, 郭会荣, 等. 华北平原水文地质参数调查研究报告[R]. 2005. (JING Menggui, WANG Bingguo, GUO Huirong, et al. Investigation of hydrogeological parameters in North China Plain[R]. 2005. (in Chinese))
- [44] 河北省水文总站. 河北省地下水资源评价报告[R]. 1990. (Hebei hydrological station. Evaluation of groundwater resource in Hebei[R]. 1990. ((in Chinese))
- [45] 吴庆华, 张薇, 蔺文静, 等. 人工示踪方法评价地下水入渗补给及其优先流程度以河北栾城和衡水为例[J]. 地球学报, 2014, 35(4): 495-502. (WU Qinghua, ZHANG Wei, LIN Wenjing, et al. The estimation of groundwater recharge and preferential flow based on the applied tracers: A case study of Luancheng and Hengshui areas in Hebei province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(4): 495-502. (in Chinese)) DOI: 10.3975/cagsb.2014.04.12.