

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.04.14

# 基于 Budyko 假设的黄河下游非一致性径流模拟

丛培月<sup>1</sup>, 牟献友<sup>1</sup>, 冀鸿兰<sup>1</sup>, 张宝森<sup>2</sup>

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;  
2. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 径流变化直接影响着流域水资源合理开发与利用, 径流量的统计与模拟至关重要。为分析非一致性水文条件下径流模拟的不确定性问题, 以黄河下游地区为研究对象, 采用灰色关联法确定黄河下游径流的主要影响因素, 采用滑动样本熵法对水文序列进行突变检验, 同时采用在 Budyko 假设基础上构造出的 Zhang 模型进行径流模拟。结果表明: 降水和气温是径流产生的主要因素 ( $\gamma > 0.5$ ); 黄河下游的降水、气温水文气象时间序列在 1990 年前后发生了较大的变化, 破坏了水文序列的一致性; 改进后的 Budyko 模型模拟精度更高 ( $NSE > 0.9$ ), 表明 Zhang 模型可用在黄河下游非一致性水文气象序列的径流模拟中。

**关键词:** 降水量; 气温; 灰色关联法; 滑动样本熵; Budyko 假设; 径流模拟; 黄河下游

中图分类号: P333 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2019)04-0092-06

## Runoff simulation of non-uniform in the lower reaches of the Yellow River based on Budyko hypothesis

CONG Peiyue<sup>1</sup>, MOU Xianyou<sup>1</sup>, JI Honglan<sup>1</sup>, ZHANG Baosen<sup>2</sup>

(1. School of Hydraulic & Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;  
2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** Runoff changes directly affects the rational development and utilization of water resources in the basin, and the statistics and simulation of runoff are essential. In order to analyze the uncertainty of runoff simulation under non-uniform hydrological conditions, the lower reaches of the Yellow River are studied. The main influencing factors of runoff in the lower reaches of the Yellow River were determined by grey correlation method, the sliding sample entropy was used to test the hydrological sequence, and the Zhang model was constructed based on the Budyko hypothesis. The results showed that precipitation and temperature are the main factors for runoff generation ( $\gamma > 0.5$ ). The precipitation and temperature hydrological meteorological time series in the lower Yellow River have undergone major changes around 1990, which destroyed the consistency of hydrological sequences. The Budyko model has a higher simulation accuracy ( $NSE > 0.9$ ), indicating that it can be used in the runoff simulation of the inhomogeneous hydrometeorological sequence in the lower Yellow River.

**Key words:** precipitation; temperature; gray correlation analysis; sliding sample entropy; Budyko hypothesis; runoff simulation; the lower reaches of the Yellow River

## 1 研究背景

黄河是我国第二大河流, 多年平均径流量为  $580 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 约占全国总径流量的 2%<sup>[1]</sup>。2014 年,

IPCC 全球气候变化第五次评估报告显示: 全球气候变暖已被广泛认可, 变暖体现在地表温度上升、极端气候事件频率增加等方面, 1880-2012 年全球平均温度已升高  $0.85^\circ\text{C}$ , 气候变化的严重性远超过以往

收稿日期: 2018-10-15; 修回日期: 2019-02-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508401); 2018 年自治区应用技术研究与开发资金项目(201802104); 国家自然科学基金项目(51369017)

作者简介: 丛培月(1993-), 女, 辽宁凌源人, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学。

通讯作者: 牟献友(1969-), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为水力学及河流动力学。

的认知<sup>[2]</sup>。气候变化会改变降水及蒸散发,造成水文气象序列出现非一致性<sup>[3]</sup>。水文气象的非一致性会影响陆地水循环过程,驱动径流量的变化<sup>[4]</sup>。由于历史资料的缺失,黄河径流量演化规律的分析 and 判别将受到一定的限制<sup>[5]</sup>,因此,流域径流关系演变分析、径流模拟应运而生,成为当前水文水资源领域研究的前沿与热点之一,也是国际上一个具有挑战性的问题<sup>[6]</sup>。

近 50 年来,黄河径流量较以往有着显著差异,国内外许多学者针对中国各江河流域的径流模拟,进行了定量分析研究<sup>[7-8]</sup>。顾朝军等<sup>[9]</sup>分析了黄河陕县站 1919 - 1997 年天然径流量变化,指出黄河天然径流量年际变化存在明显的阶段性及周期性特征;王雁等<sup>[10]</sup>通过对径流和气象观测数据的统计分析,发现黄河流域由于气候变化引起了径流量的减少。张建云等<sup>[11]</sup>提出,自 20 世纪 70 年代以来,受气候变化的影响,黄河中游河川径流呈现明显的下降趋势。孙福宝等<sup>[12]</sup>基于 Budyko 假设的傅报璞公式检验了干旱区水热耦合理论。熊立华<sup>[13]</sup>分析了 Budyko 假设在中国南部湿润地区的适用性,并提出 Budyko 公式改进方法,提高了径流模拟精度。张丽梅等<sup>[14]</sup>利用 Budyko 假设分析渭河年径流量变化特征。对径流的模拟大多是基于水文气象序列概率分布及其参数随时间不变的假定<sup>[15]</sup>,张波等<sup>[16]</sup>指出,在环境变化的大背景下,一致性假设的水文理论无法精准地揭示水资源演变规律,在此背景下提出了非一致性年径流模拟方法,使结果更加真实、可靠;唐雄朋等<sup>[17]</sup>探讨了雅鲁藏布江拉孜以上流域非一致性径流过程模拟与预测,径流模拟精度较高;邓晓宇等<sup>[18]</sup>对气候变化和人类活动综合影响下的抚河流域进行径流模拟研究,发现纳西系数达到 0.82 以上。Milly 等<sup>[19]</sup>指出,在气候变化和人类活动的影响下,年径流序列通常是非一致性的,导致许多现有方法径流模拟的精度较低;Merz 等<sup>[20]</sup>根据奥地利 273 个盆地 41 a 的历史数据,通过校准模型参数来进行非一致性径流模拟,提高了径流模拟精度;Pathiraja 等<sup>[21]</sup>通过使用集合卡尔曼滤波器同时估计模型参数,对西澳大利亚实验区进行径流预测,得出预测结果可被接受。

目前,对基于 Budyko 公式改进的 Zhang 模型在黄河下游流域的适用性研究尚有空缺。本文利用灰色关联法<sup>[22]</sup>与滑动样本熵等方法对黄河下游水文气象序列进行非一致性识别,将改进的 Zhang 模型应用于黄河下游,研究其在非一致性水文气象序列

中模拟径流的适用性。

## 2 资料与方法

### 2.1 研究区概况

河南郑州桃花峪以下的黄河河段为黄河下游,地处中国东部,流经河南、山东,于山东垦利县注入渤海。黄河下游段位于东经 110° ~ 120°、北纬 30° ~ 40° 之间,河长约 786 km,为典型游荡型河段,河道宽浅,流域面积约  $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占全流域面积的 3% 左右,总落差 93.6 m,平均比降 0.12%。黄河下游属于温带季风气候,夏季高温多雨(夏季季平均降水量为 371.76 mm,夏季季平均气温为 26.39℃),冬季寒冷干燥(冬季季平均降水量为 56.71 mm,冬季季平均气温为 1.34℃),多年平均降雨量约 617.52 mm,年内降水分布不均,多年平均气温约 14.49℃,多年平均径流量约  $253.45 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,多年平均日照时数约 2 548.77 h。根据降雨径流分带,大部分为半湿润地带。

### 2.2 数据来源

收集了黄河下游 7 个水文站(花园口、夹河滩、高村、孙口、艾山、涑口、利津)1979 - 2015 年共 37 a 的逐日降雨、逐日气温、逐日流量等水文资料以及周边 4 个气象站(郑州、开封、济南、惠民)的 1979 - 2015 年逐日日照时数等气象资料,数据均来源于黄河流域历年水文年鉴、中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。

### 2.3 研究方法

本文利用灰色关联法分析径流复杂现象与降水、气温发展态势的关联、接近的程度,从而确定径流形成的主控因素。由于水文气象序列的非一致性会直接影响降水和潜在蒸散量,造成气候 - 径流关系的方式不同于过去的观察<sup>[23]</sup>,因此在非一致性水文气象序列下,选用基于历史经验的水文模型将影响模拟精度。本文首先进行水文气象序列的一致性验证,利用累积距平法和滑动平均法进行初步检验,并基于滑动样本熵法<sup>[24]</sup>进行突变分析,联合多种分析方法对水文气象一致性进行诊断。由于实际蒸发量难以通过观测直接获得,通常利用潜在蒸散量来计算实际蒸发量<sup>[25]</sup>,本文采用在湿润与半湿润区优先选择的 Hargreaves<sup>[26]</sup>法估算潜在蒸发量,通过潜在蒸发量利用 Budyko 假设计算蒸发量,最后利用水量平衡法反算径流量。

2.3.1 Budyko 假设 Budyko(1974 年)假设基本原理是:假定流域内降水和潜在蒸散量决定了多

年平均蒸散发,蒸散发量为降水与潜在蒸散发量之间的函数,即可以对降水、潜在蒸散发和径流之间定量关系进行较好的拟合<sup>[27]</sup>。但是由于植被类别、土壤水力特性及地形的区别,使得 Budyko 假设的广泛性受到限制,Zhang 等在 Budyko 基础上引进模型参数  $\omega$ ,改进了 Budyko 假设公式。

Budyko 假设可简单表达为:

$$\frac{E}{P} = f\left(\frac{E_0}{P}\right) = f(F) \quad (1)$$

$$\frac{E_0}{P} = F \quad (2)$$

Zhang 公式:

$$\frac{E}{P} = (1 + \omega F)(1 + \omega F + 1/F) \quad (3)$$

式中: $E$  为年平均蒸发量,mm;  $P$  为年平均降水量,mm;  $\omega$  为植被水分利用系数;  $F$  为干燥指数;  $E_0$  为年平均潜在蒸散发量,mm。

水量平衡法:

$$R = P - E \quad (4)$$

式中: $R$  为径流深,mm;  $P$  为降水量,mm;  $E$  为蒸发量,mm。

2.3.2 模拟精度分析 本文采用纳西系数( $NSE$ )对年径流量的模拟精度进行评价。 $NSE \in (-\infty, 1)$ ,其中当  $NSE = 1$  时,模拟精度最优; $NSE \in (0.01, 1)$  时,模拟精度为可接受。

$$NES = 1 - \frac{\sum (E_{est} - E_{obs})^2}{\sum (E_{obs} - \bar{E}_{obs})^2} \quad (5)$$

式中: $E_{est}$  为估算的径流量, $m^3$ ;  $E_{obs}$  为观测的径流

量, $m^3$ ;  $\bar{E}_{obs}$  为多年平均观测径流量, $m^3$ 。

### 3 结果与分析

#### 3.1 降水、气温与径流灰色关联度

以黄河下游 7 个水文站为代表站,设定降雨径流灰色关联度为  $\gamma_1$ ,气温径流灰色关联度为  $\gamma_2$ 。通过计算得出 1979-2015 年 7 个水文站的  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ ,如表 1 所示。7 个站的  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  均大于 0.5,表示径流量与降水和气温关联度较高,即气温和降水均为黄河下游径流量的主控因素。此结果与张国宏等<sup>[28]</sup>的研究结论相似,黄河流域径流量与气温和降水均有较好的相关性,其中各站均为  $\gamma_2 > \gamma_1$ ,表明在黄河下游径流形成过程中,气温与径流量的关联度较大,对径流的影响所占的权重大于降水。

表 1 1979-2015 年降水、气温与径流的灰色关联度

灰色 关联度	花园口	夹河滩	高村	孙口	艾山	冻口	利津
$\gamma_1$	0.61	0.61	0.60	0.61	0.60	0.61	0.53
$\gamma_2$	0.64	0.62	0.61	0.62	0.61	0.64	0.61

#### 3.2 降水、气温变化趋势分析

表 2 为 1979-2015 年黄河下游 7 个水文站的降水与气温突变年份。由表 2 可知,1979-2015 年黄河下游流域降水和气温突变点不一致,如夹河滩站降水时间序列发生突变的时间为 1999 年,气温时间序列发生突变的时间为 1993 年;突变时间均在 20 世纪 90 年代前后,水文气象时间序列突变时间具有较高的同步性。本文以花园口站降水、气温变化趋势分析为例,其余 6 个站不再赘述。

表 2 1979-2015 年黄河下游 7 个站降水与气温突变年份

项目	花园口	夹河滩	高村	孙口	艾山	冻口	利津
降水	1986、1993	1999	1993、2008	1986、1991	1995、2006	1990	1995
气温	1991、1994	1993	1997	1993	1987、1999	1989	1997

黄河下游 1979-2015 年间多年平均降水量为 617.52 mm,降水量总体偏少。由线性拟合结果(图 1(a)),降水量倾向率为  $-4.5 \text{ mm}/10\text{a}$ ,呈显著性减少趋势( $p < 0.05$ ),其中降水量最大值出现在 1983 年(962.94 mm),最小值出现在 1997 年(368.96 mm),极值比 1.61。从降水量累积距平曲线(图 1(b))可以看出:花园口站在 1979-2015 年间降水量变化呈现出先波动下降、后波动上升的趋势,即降水量变化分为两个阶段:第 1 阶段 1979-2002 年,该时期降水量平均值为 596.24 mm;第 2 阶段 2003

-2015 年,该时期降水量平均值为 639.39 mm,第 1 阶段到第 2 阶段的变化呈现了降水枯-丰转变的过程,表明降水时间序列已发生变化。

1979-2015 年,花园口站多年平均气温为  $15.14^\circ\text{C}$ ,年平均气温倾向率为  $0.6^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。由线性拟合(图 2(a))可看出,花园口 1979-2015 年 38 a 的年平均气温呈现显著上升趋势( $p < 0.05$ )。其中最高值和最低值分别出现在 2015 和 1984 年,分别为  $16.67^\circ\text{C}$  和  $13.68^\circ\text{C}$ ,极值比为 0.22。与降水量的变化相比,气温的变化较为平缓。从图 2(b)的累

积距平曲线可以看出,花园口站年平均气温表现出先下降后上升的发展趋势,自 1997 年起,花园口站气温开始由低温期向高温期过渡,表明气温时间序列也已发生变化。

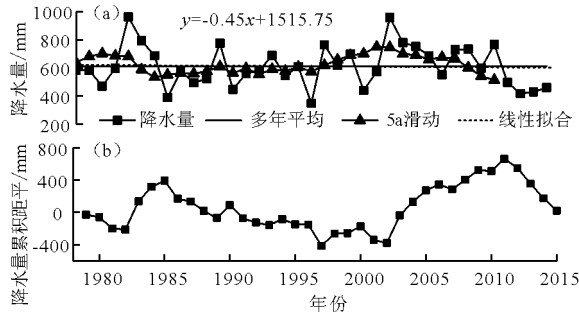


图 1 花园口站 1979 - 2015 年年降水量时间序列变化趋势

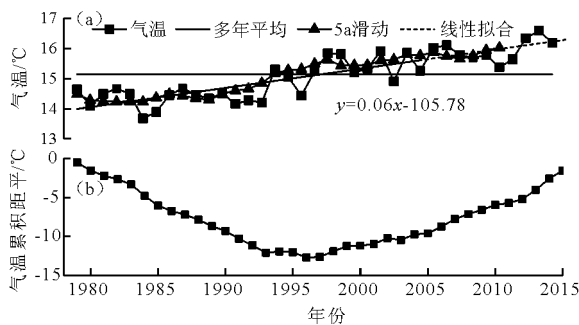


图 2 花园口站 1979 - 2015 年年均气温时间序列变化趋势

降水量的滑动样本熵 (SampEn) 呈现逐渐增加的趋势 (图 3(a)), 降水量变化分为 3 个阶段: 第 1 阶段 (1979 - 1986 年)、第 2 阶段 (1987 - 1993 年)、第 3 阶段 (1994 - 2015 年), 即发生了两次突变, 对应的突变点年份分别为 1986 和 1993 年, 突变点前后的 SampEn 序列差异性显著。气温的 SampEn 值在 0.6 ~ 0.9 之间 (图 3(b)), 其变化也呈现出 3 个阶段: 第 1 阶段 (1979 - 1991 年)、第 2 阶段 (1992 - 1994 年)、第 3 阶段 (1995 - 2015 年), 对应的突变点年份分别为 1991 和 1994 年, 气温时间序列的 SampEn 值均大于降水量序列, 表明气温系统的复杂程度高于降水系统。

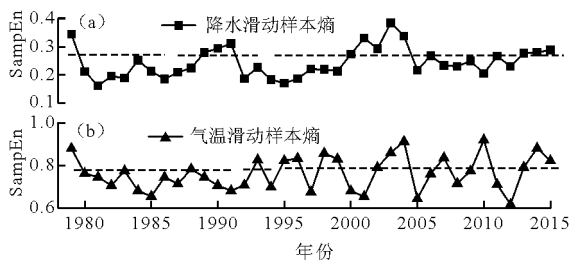


图 3 花园口站 1979 - 2015 年年降水量、气温时间序列 SampEn 分析

整体而言,从发生突变的年份来看,年降水量和年平均气温发生突变的时间有较高的对应关系。由以上水文序列发生突变可知,水文序列的统计规律并非一致,因此水文序列不满足一致性。非一致性在径流、降水和气温中已被广泛认定。

### 3.3 潜在蒸散发量估算

利用 Hargreaves 方法在黄河下游 4 个水文站点 (花园口、夹河滩、艾山、利津) 中进行潜在蒸散发量估算,估算结果见图 4。从图 4 可知,具有相似规律特征,年平均潜在蒸散发量从 850 ~ 1 200 mm 不等,潜在蒸散发量均呈现随时间减少的显著趋势 ( $p < 0.05$ ), 4 个站点的气候倾向率分别为 -20.8、-34.8、-76.3 和 -38.2 mm/10a, 其中利津站在 1990 年前后出现了小幅回升,1979 - 1993 年潜在蒸散发量呈现下降的趋势,气候倾向率为 -34.60 mm/10a, 2010 - 2014 年潜在蒸散发量呈现上升的趋势,气候倾向率为 51.79 mm/10a, 这些变化符合近 50 年来中国潜在蒸散量的变化趋势<sup>[29]</sup>。

### 3.4 Budyko 假设径流模拟精度分析

由于 Budyko 假设没有考虑人类活动和气候变化对径流量的影响,因此利用降水量与潜在蒸散发量,同时基于 Budyko 假设改进的 Zhang 模型求得蒸发量,通过水量平衡法反算径流量。本文以 1982 年为例,模拟计算了逐月径流量并与实测值进行对比,如图 5 所示。分析图 5 可知:花园口站在 8 月模拟结果误差最大 ( $NSE < 0$ ), 在 2 月 ( $NSE = 0.81$ ) 和 5 月 ( $NSE = 0.97$ ) 模拟结果较为理想,夹河滩站和艾山站分别在 7、8 月模拟结果误差最大 ( $NSE = 0$ ), 利津站在 4 月 ( $NSE = 0.97$ )、5 月 ( $NSE = 0.99$ )、6 月 ( $NSE = 0.86$ ) 模拟结果较为理想,模拟精度较高。表 3 给出了黄河下游 4 个典型区 1982 年月均径流模拟 NSE 检验结果,4 个典型区的 NSE 均小于 0。综合以上研究结果,在月尺度径流模拟中各个月模拟值与实测值之间误差较大,模拟精度过低,因此 Zhang 公式不适用于月尺度径流模拟中。

利用 Zhang 公式对 4 个水文站的 1979 - 2015 年径流过程进行模拟,结果如图 6 所示,模拟的径流变化过程与实际的径流变化过程基本吻合,能较好地反映径流的变化趋势和数值,但在 2000 年后个别年份模拟值与实际值差别较大,如花园口站 2005 年 ( $NSE = -0.62$ )、2011 年 ( $NSE = -2.27$ ), 艾山站 2010 年 ( $NSE = -4.77$ )。但整体来看,4 个典型区径流模拟的纳西系数均大于 0.9 (如表 4 所示),说明模型精度较高,模拟结果可以接受,Zhang 公式在年径流量模拟方面具有一定的适用性。

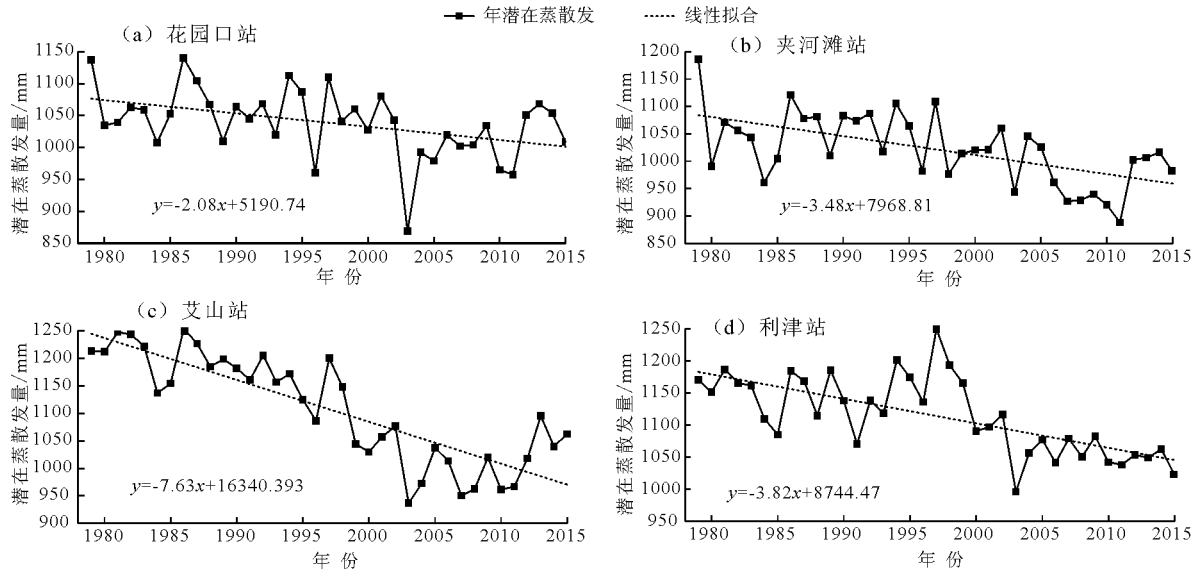


图4 黄河下游4个水文站1979-2015年潜在蒸散发量变化

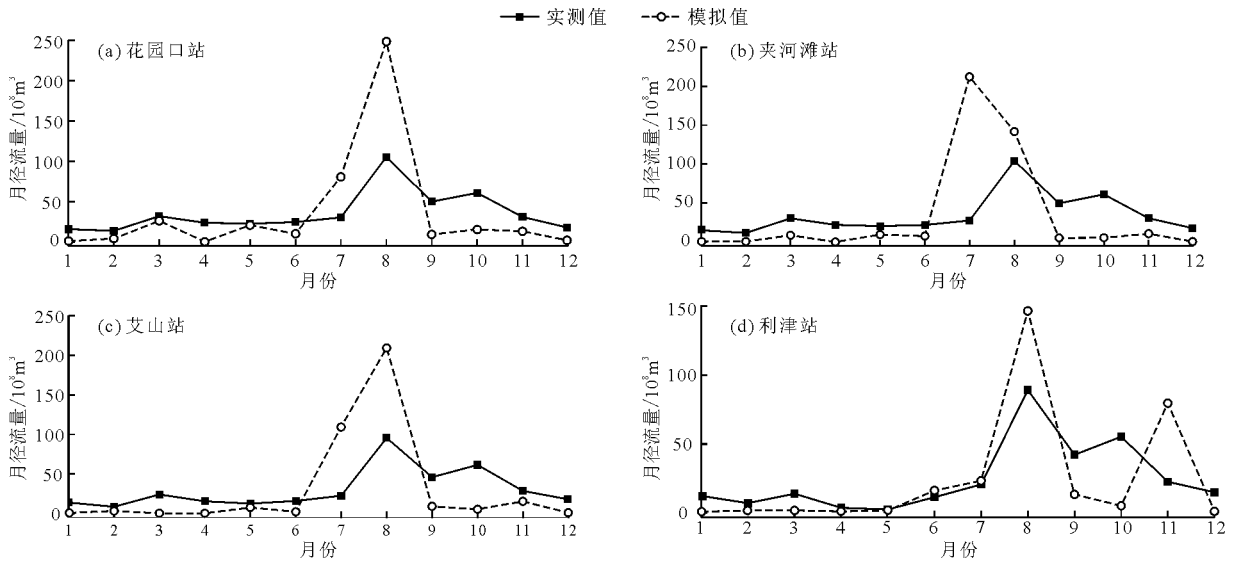


图5 1982年黄河下游4个水文站月径流量观测值与模拟值变化分析

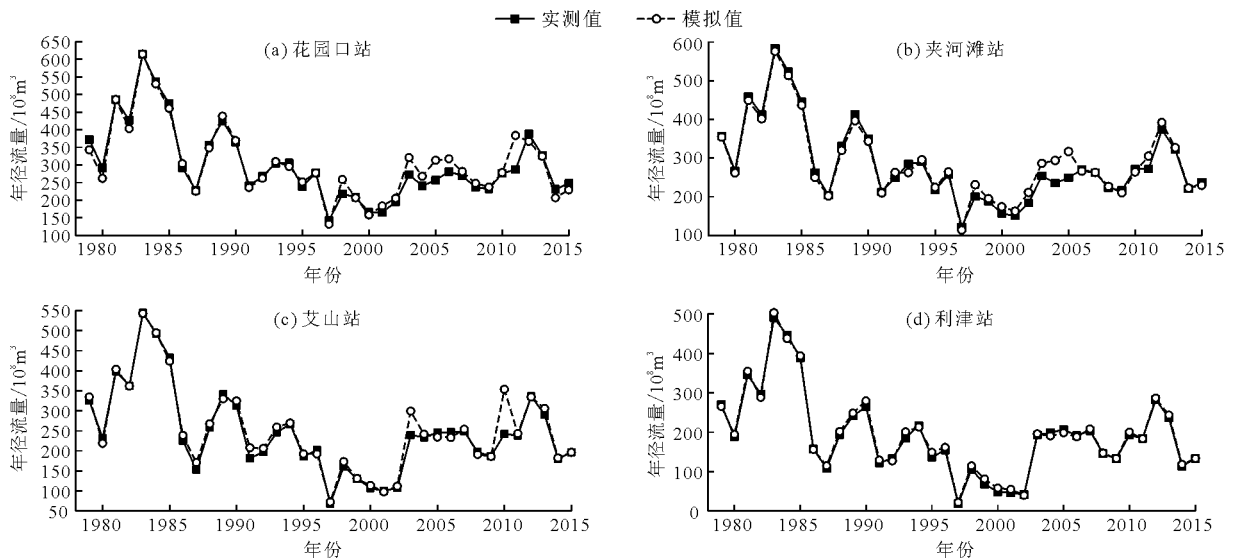


图6 1979-2015年黄河下游4个水文站年径流量观测值与模拟值变化分析

表3 1982年黄河下游4个水文站月径流量NSE对比

花园口	夹河滩	艾山	利津
-2.85	-4.66	-2.71	-0.46

表4 1979-2015年黄河下游4个水文站年径流量NSE对比

花园口	夹河滩	艾山	利津
0.94	0.96	0.95	0.96

径流量模拟的差异性受诸多因素影响,水文气象序列的选择、人类活动和气候变化等可直接影响径流量模拟精度。本文利用基于 Budyko 假设改进的 Zhang 模型对黄河下游进行径流量模拟,经过验证表明模型精度较高,适应于黄河下游流域非一致性水文气象序列的径流量模拟,可为黄河下游径流量分析、预报提供可靠的数据支持。

## 4 结论

(1)黄河下游降水量呈现出显著减少趋势( $p < 0.05$ ),气温呈现出显著增加趋势( $p < 0.05$ ),利用滑动样本熵从动力学的角度判别出降水量、气温均在20世纪90年代前后出现突变,且突变年份具有较高的同步性。

(2)黄河下游径流变化过程受多因素影响,其中 $\gamma_1$ 和 $\gamma_2$ 均大于0.5,表明降水量和气温与径流量的关联程度均较高,是影响径流量变化的主要因素。

(3)基于 Budyko 假设改进的 Zhang 模型模拟了黄河下游非一致性水文气象序列下的年径流量,NSE达到0.9以上,模拟效果良好,表明 Zhang 模型在黄河下游非一致性水文气象序列中模拟径流量具有可适性。

### 参考文献:

[1] 潘彬,韩美,倪娟.黄河下游近50年径流量变化特征及影响因素[J].水土保持研究,2017,24(1):122-127.

[2] 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,2013,35(5):1068-1076.

[3] PIAO Shilong, CIAIS P, HUANG Yao, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010, 467(7311):43-51.

[4] 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.

[5] 李二辉,穆兴民,赵广举. 1919-2010年黄河上中游区径流量变化分析[J]. 水科学进展,2014,25(2):155-163.

[6] FIROUZI S, MOHAMAD B S. Calibration of a Rainfall -

Runoff Model to Estimate Monthly Stream Flow in an Ungauged Catchment [J]. Computational Water, Energy, and Environmental Engineering. 2015,4:57-66.

[7] 王金星,张建云,李岩,等. 近50年来中国六大流域径流年内分配变化趋势[J]. 水科学进展,2008,19(5):656-661.

[8] 曹建廷,秦大河,罗勇,等. 长江源区1956-2000年径流量变化分析[J]. 水科学进展,2007,18(1):29-33.

[9] 顾朝军,穆兴民,高鹏,等. 1961-2014年黄土高原地区降水和气温时间变化特征研究[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(3):136-143.

[10] 王雁,丁永建,叶柏生,等. 黄河与长江流域水资源变化原因[J]. 中国科学:地球科学,2013,43(7):1207-1219.

[11] 张建云,王国庆,贺瑞敏,等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J]. 水科学进展,2009,20(2):153-158.

[12] 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,2007,38(4):409-416.

[13] 熊立华. 年径流频率分析的一次二阶矩法及其应用[J]. 水科学进展,2017,28(3):390-397.

[14] 张丽梅,赵广举,穆兴民,等. 基于 Budyko 假设的渭河径流变化归因识别[J]. 生态学报,2018,38,(21):7607-7617.

[15] VOGEL R M, WILSON I. Probability distribution of annual maximum, mean, and minimum stream flows in the United States [J]. Journal of Hydrologic Engineering. 1996,1(2):69-76.

[16] 张波,谢平,李彬彬,等. 基于典型解集模型的非一致性年径流过程设计方法[J]. 水文,2015,35(2):1-7.

[17] 唐雄朋,刘艳丽,张建云,等. 气候变化下雅鲁藏布江拉孜以上流域径流过程模拟与预测[J]. 水文,2018,38(6):24-30.

[18] 邓晓宇,张强,陈晓宏. 气候变化和人类活动综合影响下的抚河流域径流模拟研究[J]. 武汉大学学报(理学版),2015,61(3):262-270.

[19] MILLY P C D, BETANCOURT J, FALKENMARK M, et al. Stationarity is dead: whether water management [J]. Science, 2008, 319(5863), 573-574.

[20] MERZ R, PARAJKA J, BLÖSCHL G. Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses [J]. Water Resources Research, 2011,47(2):1-17.

[21] PATHIRAJA S, MARSHALL L, SHARMA A, et al. Hydrologic modeling in dynamic catchments: A data assimilation approach [J]. Water Resources Research, 2016,52(5):3350-3372.

(下转第112页)

- [9] GONG Li, JIN Chunling. Water poverty theory and its application in urban water security [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 610-613: 677-680.
- [10] 孙才志, 汤玮佳, 邹玮. 中国农村水贫困与城市化、工业化进程的协调关系研究 [J]. *中国软科学*, 2013(7): 86-100.
- [11] 邝美娟, 谢红霞, 隋兵, 等. 湖南省近50年降水特征分析 [J]. *水土保持研究*, 2013, 20(5): 145-149.
- [12] 杨玉蓉, 张青山, 邹君. 基于村级尺度的湖南农村水贫困比较研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(7): 1027-1034.
- [13] SULLIVAN C A, MEIGH J R, GIACOMELLO A M. The water poverty index: development and application at the community scale [C]// *Natural Resources Forum*. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2003, 27(3): 189-199.
- [14] GARRIGA R G, FOGUET A P. Improved method to calculate a water poverty index at local scale [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2010, 136(11): 1287-1298.
- [15] 杨雅琴. 城市化内涵、推进与公共服务: 一个文献评述 [J]. *经济体制改革*, 2014(4): 5-9.
- [16] 蔡继, 董增川, 陈康宁. 产业结构调整与水资源可持续利用的耦合性分析 [J]. *水利经济*, 2007(5): 43-45+77.
- [17] 马丽, 金凤君, 刘毅. 中国经济与环境污染耦合度格局及工业结构解析 [J]. *地理学报*, 2012, 67(10): 1299-1307.
- [18] 余菲菲, 胡文海, 荣慧芳. 中小城市旅游经济与交通耦合协调发展研究——以池州市为例 [J]. *地理科学*, 2015, 35(9): 1116-1122.
- [19] 张胜武, 石培基, 王祖静. 干旱区内陆河流域城镇化与水资源环境系统耦合分析——以石羊河流域为例 [J]. *经济地理*, 2012, 32(8): 142-148.
- [20] CULLIS J, O REGAN D. Targeting the water-poor through water poverty mapping [J]. *Water Policy*, 2004, 6(5): 397-411.
- [21] 陈明星, 陆大道, 张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析 [J]. *地理学报*, 2009, 64(4): 387-398.

(上接第97页)

- [22] 朱双, 周建中, 孟长青, 等. 基于灰色关联分析的模糊支持向量机方法在径流预报中的应用研究 [J]. *水力发电学报*, 2015, 34(6): 1-6.
- [23] CHIEW F H S, POTTER N J, VAZE J, et al. Observed hydrologic non-stationarity in far south-eastern Australia: implications for modelling and prediction [J]. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2014, 28(1): 3-15.
- [24] RICHMAN J S, RANDALL M J. Physiological time-series analysis, using approximate entropy and sample entropy [J]. *American Journal of Physiology - Heart and Circulatory Physiology*, 2000, 278(6): H2039-H2049.
- [25] 李天生, 夏军, 匡洋, 等. 不同潜在蒸散发估算方法在汉江流域中上游地区的适用性研究 [J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(6): 1-10.
- [26] HARGREAVES G H. Moisture availability and crop production [J]. *Transactions of the ASAE*, 1975, 18(5): 980-984.
- [27] 郭生练, 郭家力, 侯雨坤, 等. 基于Budyko假设预测长江流域未来径流量变化 [J]. *水科学进展*, 2015, 26(2): 151-160.
- [28] 张国宏, 王晓丽, 郭慕萍, 等. 近60a黄河流域地表径流变化特征及其与气候变化的关系 [J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(7): 91-95.
- [29] 赵亚迪, 刘永和, 李建林, 等. 1960-2013年中国地表潜在蒸散发时空变化及其对气象因子的敏感性 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 2018, 12(3): 1-9.