

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0054

樊贤璐,徐国宾,邓恒,等. 1975—2015年洪泽湖水沙变化趋势及成因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(3): 07-15. FAN X L, XU G B, DENG H, et al. Water and sediment trends and their causes in the Hongze Lake from 1975 to 2015[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 07-15. (in Chinese)

# 1975—2015年洪泽湖水沙变化趋势及成因分析

樊贤璐,徐国宾,邓恒,段宇,陈春锦

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300354)

**摘要:**淮河流域洪涝灾害频繁,洪泽湖对其防洪除涝起关键性作用。掌握洪泽湖水沙变化趋势及突变点对流域水资源管理、水沙调节有重要的现实意义。利用入、出洪泽湖各支流代表水文站 1975—2015 年实测年径流量和年输沙量数据,分析入、出洪泽湖水量和沙量分布特征。通过 Mann-Kendall(M-K)秩相关检验法和 Pettitt 突变点识别法研究入湖、出湖水沙量年际变化趋势和突变点。在此基础上,从流域降雨、水资源开发利用和水库滞沙三个方面分析了洪泽湖水沙变化的主要影响因素。研究表明:洪泽湖入湖、出湖水量年际变化趋势一致,无明显减小趋势,且无显著突变点。入湖沙量有小幅减小趋势,出湖沙量 M-K 统计值超过 95% 显著性水平,有明显减小趋势。入湖、出湖沙量发生突变的年份为 1991 年。对影响因素的分析得到:降雨量变化是水量变化的重要影响因素。1993—2015 年,入湖水量呈不明显减小趋势则与流域用水量明显增加、水资源开发利用程度不断提高有关。上游水库建设是导致洪泽湖沙量有明显减小趋势的主要原因,1991 年治淮工程的实施,水库复建和水土保持等措施是沙量突变的主要原因。

**关键词:**洪泽湖;水沙;趋势分析; Mann-Kendall-Pettitt 组合突变检验;成因分析

中图分类号:TV122 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Water and sediment trends and their causes in the Hongze Lake from 1975 to 2015

FAN Xianlu, XU Guobin, DENG Heng, DUAN Yu, CHEN Chunjin

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

**Abstract:** The flood disasters are frequent in the Huaihe River Basin, and Hongze Lake plays a key role in flood control. It is of great practical significance for water resources management, streamflow and sediment regulation to detect the trend and changing points of streamflow and sediment in the Hongze Lake. The temporal characteristics of streamflow and sediment in the Hongze Lake were investigated with observed annual streamflow and sediment discharge data at representative hydrological stations from 1975 to 2015. The Mann-Kendall trend test and the Pettitt change point detection method were used to explore temporal trend and changing points of streamflow and sediment. The main influencing factors of streamflow and sediment changes in the Hongze Lake were identified from the aspects of river water resources development and utilization, basin rainfall and sediment retaining of reservoir. The research showed that the annual variations of inflows and outflows of the Hongze Lake was consistent, and there was not statistically significant trend or changing point. There was a slight and insignificant decreasing trend for the amount of sediment inflows at 0.05 significance level, but a statistically significant decreasing trend for the sediment outflows. Sediment inflows and outflows both had a changing point in 1991. Rainfall was the most important factor affecting the variation of streamflow. The streamflow showed a decreasing trend from 1993 to 2015, which was related to the increasing development and utilization of water resources in the basin. Decrease in sediment was mainly from the upstream reservoir

收稿日期:2018-09-10 修回日期:2018-12-12 网络出版时间:2019-03-11

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190311.1154.006.html>

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0405602)

作者简介:樊贤璐(1993—),女,河北保定人,主要从事河流动力学及河床演变研究。E-mail: fanxianl26@126.com

通信作者:徐国宾(1956—),男,河北石家庄人,教授,博士,博士生导师,主要从事河流动力学及河床演变研究。E-mail: xuguob@sina.com

constructions. The main reasons for the changing points were the engineering projects of the Huaihe River started in 1991, which included the reconstruction of reservoirs and conservation countermeasures of water and soil.

**Key words:** The Hongze Lake; streamflow and sediment; trend analysis; Mann-Kendall Pettitt test

洪泽湖是中国五大淡水湖之一,作为淮河中下游地区最大的平原湖泊型水库,对淮河流域防洪除涝起到关键性作用,但是对洪泽湖的研究远落后于其他湖泊<sup>[1]</sup>。近年来,流域洪涝灾害频繁,洪泽湖对洪水的调蓄能力较差,造成大量生命财产损失<sup>[2-3]</sup>。较为显著的有 1991 年洪泽湖流域洪涝受灾面积 453.6 万  $\text{hm}^2$ ,直接导致 340 亿元的经济损失;2003 年洪涝受灾面积为 267.6 万  $\text{hm}^2$ ,经济损失达 280 亿元<sup>[4]</sup>。近年来,诸多学者对洪泽湖流域降雨变化、历史洪水及洪涝灾害等方面做了大量研究。其中,叶正伟<sup>[2-3]</sup>通过分析降雨趋势得到:降雨量是影响洪泽湖水沙变化的重要因素,降雨量的增加是 2000 年以来洪泽湖洪涝灾害的主要原因。宋玉等<sup>[5]</sup>利用分布式水文模型,根据降雨和流域内水利工程现状,进行了降雨径流与洪水过程预报研究。姜加虎等<sup>[6]</sup>根据洪泽湖历史洪水,年最高水位及湖区水文测站的水位、流量资料,进行了长、短序列的入湖洪峰流量及不同时段洪量的频率分析,最终推出洪水灾害特征。对洪泽湖水沙特性方面的研究较少,楚恩国<sup>[7]</sup>对洪泽湖流域降水、径流、暴雨洪水、蒸发、水质等特性进行了概述。虞邦义<sup>[8]</sup>利用水沙资料,通过数据整理分析、对比,得到洪泽湖区泥沙冲淤情况。而对洪泽湖长序列水沙变化趋势及成因分析相对匮乏,关于水沙突变的研究目前尚未涉及。水沙特性变化直接影响湖泊调蓄、防洪、航运等方面,因此,研究洪泽湖水沙变化趋势并对其成因进行探讨对流域洪涝灾害防治和水资源管理具有较为突出的理论意义和现实意义。

本文选取入湖、出湖河流代表水文观测站,对长序列入湖、出湖水沙数据进行系统分析和研究,探讨洪泽湖流域 1975—2015 年入湖、出湖水沙变化趋势。探索性提出了基于 Mann-Kendall 突变检验和 Pettitt 变点识别的组合突变检验法,对洪泽湖入湖、出湖水沙量的突变点进行识别。揭示降雨、人类活动对洪泽湖水沙变化的影响,科学认识洪泽湖水沙特性、变化趋势及影响因素,对洪泽湖流域治理和经济发展具有重要意义。

## 1 研究区域概况

洪泽湖位于江苏省西部,苏北平原中部西侧,淮

安、宿迁两市境内,地理位置在北纬  $33^{\circ}06'$ ~ $33^{\circ}40'$ ,东经  $118^{\circ}10'$ ~ $118^{\circ}52'$ ,为淮河中下游结合部。洪泽湖水域面积随水位波动较大,正常蓄水位为 12.5 m,蓄水面积达 2 069  $\text{km}^2$ ,承载淮河上、中游 15.8 万  $\text{km}^2$  面积来水<sup>[9]</sup>,具有防洪、灌溉、供水、发电等多种功能。入湖河流主要集中在洪泽湖西部,分别是:淮河干流、怀洪新河、新汴河、濉河、老濉河、徐洪河和池河。淮河来水来沙经洪泽湖调蓄后,第一路通过三河闸汇入长江。第二路出二河闸,分两支,一支经淮沭新河入海州湾,另一支经淮河入海水道入黄海。第三路出高良涧闸,经苏北灌溉总渠入黄海<sup>[10]</sup>。

洪泽湖湖底高程一般在 10~11 m,最低处 7.5 m 左右,湖底高程高出东侧平原 4~8 m,素有“悬湖”之称。地处亚热带与暖温带过度区,季风气候显著,汛期常有集中暴雨和连绵阴雨,6—7 月因梅雨季节长时间降雨,易造成洪涝灾害。流域人口数量不断增加,城镇密集,人类不断对水资源进行开发利用,影响洪泽湖入湖、出湖的水沙量的变化。

## 2 资料与方法

### 2.1 数据来源

本文分析数据为淮河流域入、出洪泽湖河流 10 个代表水文站年径流量、年输沙量数据,因测站测验泥沙的时间不同步,本文选取的分析时段为 1975—2015 年,数据来源为长序列《淮河流域水文年鉴》、《淮河水资源公报》和《中国河流泥沙公报》。降雨数据均来自于“中国气象数据网”(http://data.cma.cn/site/index.html)。主要河流及其代表水文站见图 1。



图 1 洪泽湖水系

Fig. 1 Water system of the Hongze Lake

## 2.2 水沙变化趋势研究方法

本文采用 Mann-Kendall (M-K) 非参数统计检验法对入、出洪泽湖水量和沙量进行趋势分析。其优点是变量可以不遵从正态分布,且检验不受少数异常值干扰,适用于水文变量的趋势检验,M-K 趋势分析方法介绍较多<sup>[11-12]</sup>,这里不再赘述。

## 2.3 水沙组合突变检验方法

气候变化和人类活动的影响通常会引起流域径流序列发生变化,并且呈现出一定的阶段性特征。研究序列于在某个时刻前后,其统计规律发生显著性变异,该时刻即为突变点。了解和诊断序列的变化趋势和变异规律,对防洪减灾、水环境治理和水文分析、预测有重要的意义。本文研究洪泽湖入、出湖水沙突变点,对水沙变化特征加深认识。在此基础上,通过分析突变点产生的原因,了解气候变化和人类活动对水沙变化的影响。

### 2.3.1 Mann-Kendall 突变检验

Mann-Kendall 突变检验<sup>[13]</sup>的基本原理是:对于时间序列  $X$  (含有  $n$  个样本),构造一个秩序列

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad k=1,2,\dots,n \quad (1)$$

$$r_i = \begin{cases} +1 & x_i > x_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad j=1,2,\dots,i \quad (2)$$

在时间序列随机独立的假定下,定义统计量

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad k=1,2,\dots,n \quad (3)$$

式中:秩序列  $S_k$  是第  $i$  时刻数值大于  $j$  时刻数值个数的累计数。 $UF_1 = 0$ ;  $E(S_k)$ 、 $\text{Var}(S_k)$  是累计数  $S_k$  的均值和方差,并且当  $x_1, x_2, \dots, x_n$  相互独立时,  $E(S_k)$ 、 $\text{Var}(S_k)$  具有相同分布,则

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4}, \text{Var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (4)$$

$UF_k$  为标准正态分布,是以时间序列  $X$  计算得到的统计量序列。在给定显著性水平  $\alpha$ , 根据正态分布表,如果  $|UF_i| > U_\alpha$ , 则序列存在明显趋势性变化。

将时间序列  $X$  逆序排列,重复上述过程,设定  $UB_k = -UF_k, k=n, n-1, \dots, 1, UB_1 = 0$ 。计算得到  $UF_k$  和  $UB_k$ , 绘制曲线。若  $UF_k$  的值大于 0, 则序列呈现上升趋势, 小于 0 则为下降趋势。取显著性水平  $\alpha=0.05$ , 当  $UF_k$  超过临界曲线  $\pm 1.96$  时, 则发生突变的几率增大。在置信区间内, 若  $UF_k$  与  $UB_k$  曲线有交点, 则即为可能的突变点。但 Mann-Kendall 突变检验不适用于存在多个或多尺度突变

的序列<sup>[14]</sup>。即当置信区间内有多个交点时,可能存在伪变点,需去除杂点<sup>[15]</sup>。

### 2.3.2 Pettitt 突变检验

变点分析即在假定序列变点位置已知的情况下,通过统计检验的方法进行识别分析。水文时间序列变点分析的目的在于识别变异序列的突变成分。该方法是一种基于秩的非参数统计检验方法,具有操作简便,明确突变的时间,识别一个水文序列突变点等的优点。Pettitt 突变检验<sup>[16]</sup>的基本原理是假设将样本任意分为两个子序列,均值相等,即表明当随机变量序列  $x_1, x_2, \dots, x_T$  被任意分割为  $x_1, x_2, \dots, x_{t_0}$  和  $x_{t_0+1}, x_{t_0+2}, \dots, x_T$  两部分后,如果前后两部分中随机变量的分布函数是  $F_{1(x)}$  和  $F_{2(x)}$ , 且  $F_{1(x)} \neq F_{2(x)}$ , 则认为变点发生在  $t_0$  处。定义如下统计量

$$U_{i,T} = \sum_{j=1}^i \sum_{k=i+1}^T \text{sgn}(x_j - x_k),$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{若 } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{若 } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{若 } x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (5)$$

当序列服从连续型分布时,检验统计量  $U_{i,T}$  通过下面的递归关系得到

$$U_{i,T} = U_{i-1,T} + V_{i,T} \quad (6)$$

对  $t=2,3,\dots,T$ , 有:

$$V_{i,T} = \sum_{j=1}^i \text{sgn}(x_j - x_i), U_{1,T} = V_{1,T} \quad (7)$$

满足下面关系式的点  $t$  则认为是最有可能的发生突变的位置。

$$K_t = |U_{t,T}| = \text{Max}|U_{i,T}| \quad (8)$$

对应的显著性概率可以通过下式近似计算得到

$$P = 2e^{\frac{-6K_t^2}{T^3}} \quad (9)$$

Pettitt 突变点识别只能识别长序列中一个变点,但水文序列中可能存在多个变点。本文借助文献<sup>[16]</sup>中方法得到 Pettitt 突变点识别的全部变点即:首先利用 Pettitt 法得到一级突变点;然后基于一级突变点将水文长序列划分为两个序列检验出新的变点直到找到序列中全部变点。

### 2.3.3 组合变点检验法

由于水文序列变异点检验方法的假设前提和适用条件有差异,所以得到的突变结果也往往不同,目前进行突变检验的方法中性能和检验结果精度尚无定论,为实现较高精度,本文基于 M-K 突变检验和 Pettitt 突变点识别提出组合变点检验法以求得到更为科学准确的变点。

组合变点检验法即:(1)首先利用 M-K 突变检

验,分析可能存在的变点和突变区域。(2)利用 Pettitt 突变点识别得到系列的所有突变点。(3)根据 M-K 突变检验得到的可能突变年份和突变区域验证 Pettitt 得到的突变点是否显著。如果变点与 M-K 突变检验得到的突变点不同或不在突变区域内,则该变点为非显著性变点。(4)最后利用 Pettitt 显著性变点去除 M-K 突变检验中的伪变点,找到真实突变点。

一方面该方法利用 Pettitt 突变点弥补了 M-K 突变检验无法辨识真伪突变点的缺陷,另一方面,相对于单一 Pettitt 突变点识别,组合突变法结合了 M-K 检验确定出的可能发生突变年份和区域,确保突变点是显著性变点,能更科学准确的识别到全部显著性突变点。

### 3 洪泽湖入湖、出湖水沙时空特征分布

#### 3.1 洪泽湖水沙分布特征

洪泽湖 1975—2015 年多年平均入湖水量为 289.2 亿  $m^3$ ,其中淮河干流多年平均入湖水量为

250.13 亿  $m^3$ ,占入湖总水量的 86.49%。多年平均出湖水量为 268.01 亿  $m^3$ ,58.96%出湖水量经三河闸排出进入长江,经二河闸排出水量占出湖总量的 29.23%,高良涧闸排出水量占比 12.81%。洪泽湖多年平均入湖沙量为 615.26 万 t,淮河干流多年平均入湖沙量为 532.45 万 t,占入湖总沙量的 86.54%。多年平均出湖沙量 313.56 万 t,三河闸多年平均输沙量 212.88 万 t,占出湖总沙量的 67.89%,二河闸多年平均输沙量占出湖总沙量 20.08%,高良涧闸输沙量仅占出湖总沙量的 12.03%。

#### 3.2 水沙趋势分析

1975—2015 年洪泽湖多年平均入湖、出湖水沙量见图 2。由图 2 可知,1975—2015 年间洪泽湖多年平均入湖、出湖水量和沙量均呈波状浮动,每年入湖水量和出湖水量相差不大,较为统一。除 1982、1994、2001、2009、2011 年外,洪泽湖入湖沙量均大于出湖沙量,总体呈淤积状态。水沙量变化密切相关,具有较为明显的多水多沙,少水少沙特性。

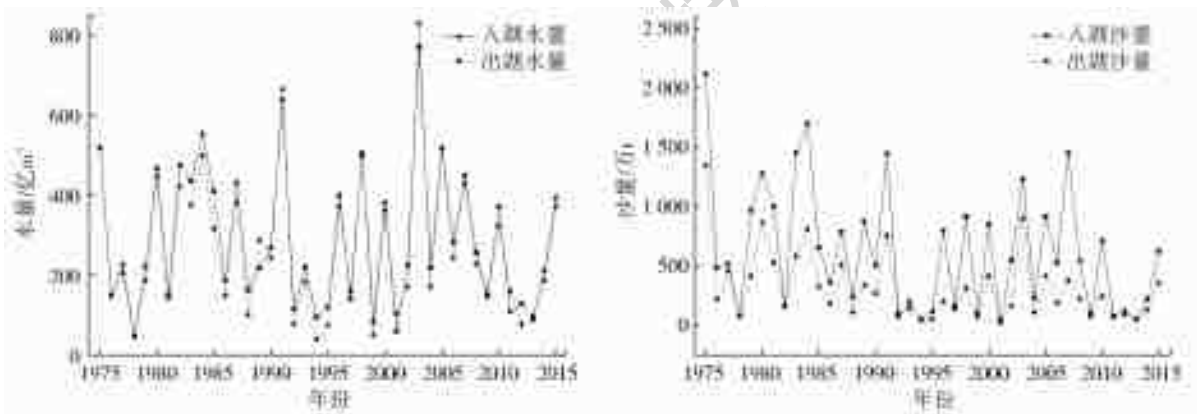


图 2 洪泽湖多年入湖、出湖水沙量

Fig. 2 The annual streamflow and sediment of the Hongze Lake

对 1975—2015 年洪泽湖入湖、出湖水沙进行 M-K 趋势检验,得到 M-K 统计量见表 1。以 1975 年为计算原点,计算得到的多年平均洪泽湖入湖、出湖水沙正序的 M-K 统计量序列见图 3。入湖水量和出湖水量 1975—2015 年 M-K 统计量分别为 -0.98 和 -0.60,减小趋势不明显,这与近 50 年来淮河流域年径流量总体呈现减小趋势,变化趋势不明显的结论一致<sup>[17]</sup>。入湖水量和出湖水量在 1982—1991 年间出现不明显增加趋势,其余均基本呈现减小趋势。其中,1994—2005 年入湖水量和出湖水量 M-K 统计值贴近显著性  $\alpha = 0.05$  时的临界值 -1.96,减小趋势相对较为显著。但 1975—2015 年整个研究期间入湖水量和出湖水量的 M-K 统计值均小于显著性水平,无显著变化趋势,洪泽湖入、出

湖水量变化属于正常波动。

表 1 洪泽湖多年入湖、出湖水量和沙量 M-K 统计量

Tab. 1 M-K statistic of the annual streamflow and sediment inflows and outflows of the Hongze Lake

项目	入湖水量	出湖水量	入湖沙量	出湖沙量
统计量	-0.98	-0.60	-1.83	-2.53
检验判别	$ Z =1.96$	$ Z =1.96$	$ Z =1.96$	$ Z =1.96$
显著性水平	无明显减小	无明显减小	小幅减小	明显减小

1975—2015 年洪泽湖入湖沙量和出湖沙量 M-K 统计量分别为 -1.83 和 -2.53,入湖沙量呈现小幅减小趋势,出湖沙量则超过显著性水平,减小趋势较为显著。入湖沙量除 1981 年和 1983—1987 年 M-K 统计值大于 0 呈增大趋势,其余均呈现减小趋势。出湖沙量除 1981、1984、1985 年 M-K

统计值大于0外,其余各年均小于0,呈现明显减小趋势。入、出湖沙量 1994—2004年和 2011—2015

年 M-K 统计值均超过临界值 -1.96,减小趋势突出。

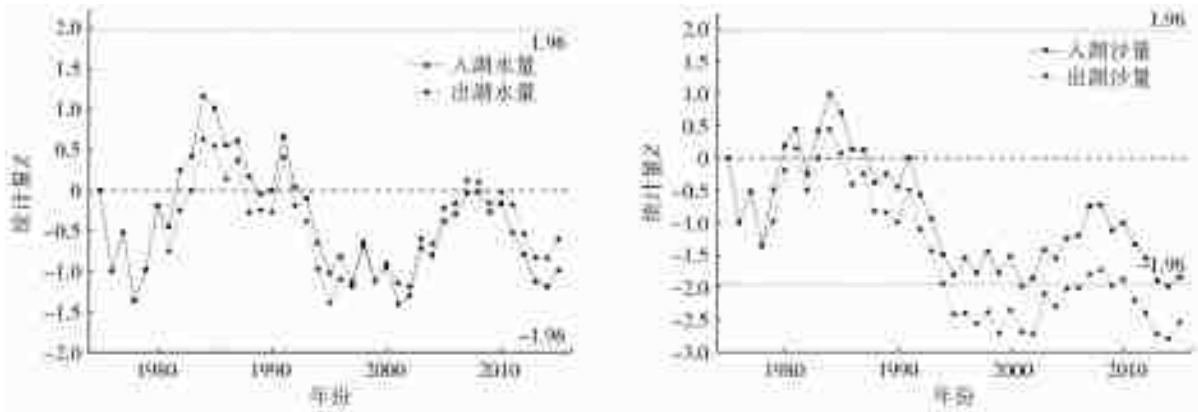


图3 洪泽湖入湖、出湖水量和沙量 M-K 统计量

Fig. 3 M-K statistic of annual streamflow and sediment inflows and outflows of the Hongze Lake

### 3.3 水沙突变点分析

根据图 2 和 3,1975—2015 年洪泽湖入湖、出湖水沙量均呈现减小趋势,但入、出湖水量 M-K 趋势分析统计量均未超过  $\alpha=0.05$  的临界值,不具有明显趋势性变化,序列不存在显著性变异,即不存在突变点。入湖、出湖沙量 M-K 统计值存在超过  $\alpha=0.05$  的临界值的情况,具有较为明显的趋势性,对入湖、出湖沙量进行突变检验,得到其突变点。

#### 3.3.1 入湖沙量突变分析

计算 1975—2015 年洪泽湖入湖沙量正、逆序列 M-K 统计量序列及 Pettitt 突变点识别曲线见图 4。入湖沙量 M-K 统计量序列曲线交点发生在 1982—1983、1991 和 2006—2012 年,可能的突变年是 1982、1991、2006 年。经过 Pettitt 变点识别,得到  $t=1991$  年,  $P=0.048$ ,确定 1991 年为一级变点。将长时间水文序列根据一级变点划分为两个序列:1975—1991 年

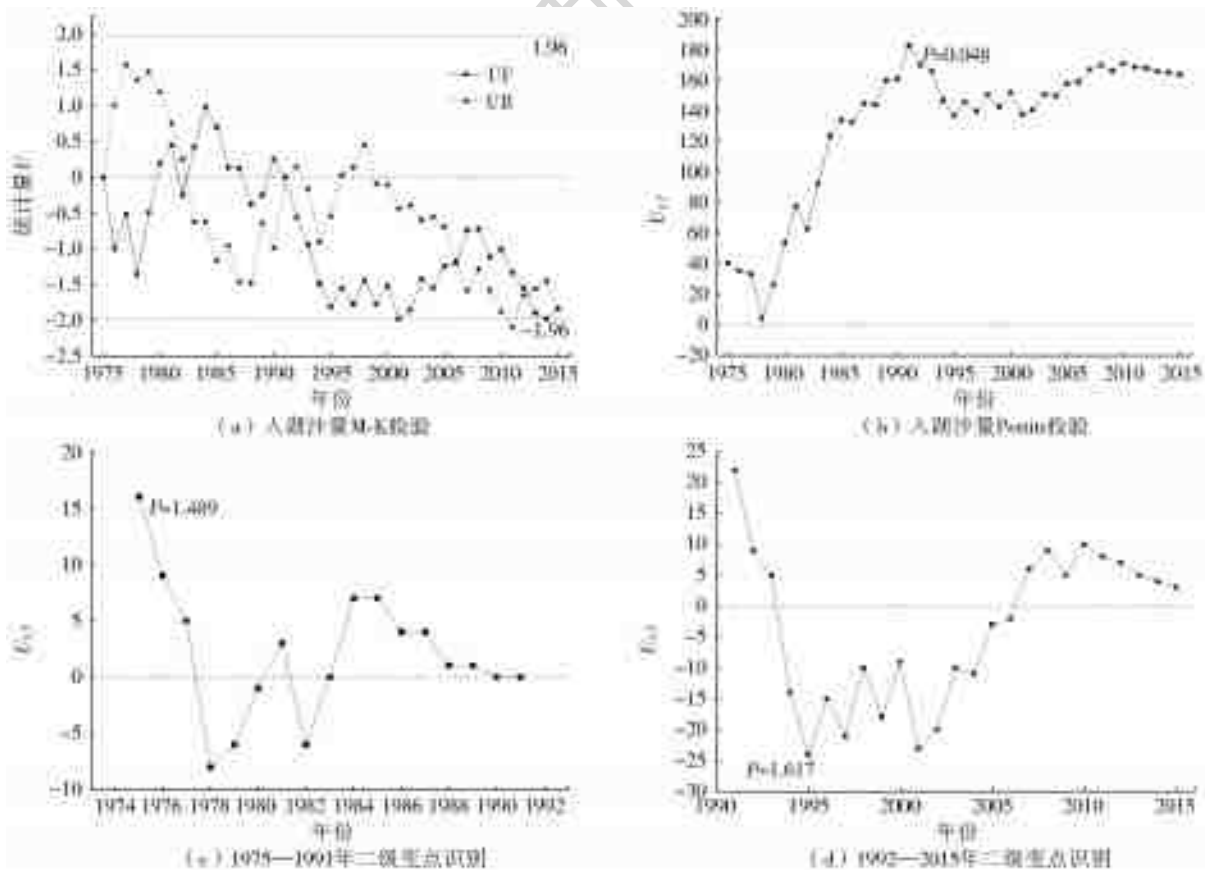


图4 入湖沙量 M-K 突变检验和 Pettitt 一、二级变点识别

Fig. 4 M-K changing point test and Pettitt test of sediment inflows

和 1992—2015 年,对其进行 Pettitt 二级变点识别。分别得到  $t=1975$  年,概率  $P=1.489$  和  $t=1995$  年,概率  $P=1.617$ ,得到的二级变点没在 M-K 可能的突变区域内,判定 Pettitt 二级变点不显著。M-K 突变检验得到的可能突变年份 1982 年和 2006 年为伪变点。综上入湖沙量突变点发生在 1991 年。

### 3.3.2 出湖沙量突变分析

出湖沙量正逆 M-K 统计量序列曲线见图 5,在置信区间内的交点有 1982 和 1991 年,1994—2006、

2010—2015 年 UF 曲线超过置信区间,是可能发生的突变区域。经 Pettitt 变点识别,得到一级变点  $t=1991$  年,  $P=0.010$ ,确定 1991 年为出湖沙量的一级突变点,与入湖沙量突变吻合。进行 1975—1991 年和 1992—2015 年的二级变点识别,分别得到  $t=1978$  和  $t=1979$  年,  $P=1.433$  和  $t=2002$  年,  $P=1.435$ ,突变年份未在 M-K 检验可能的突变区域内,变点不显著,即不存在二级变点。出湖沙量的突变点为 1991 年。

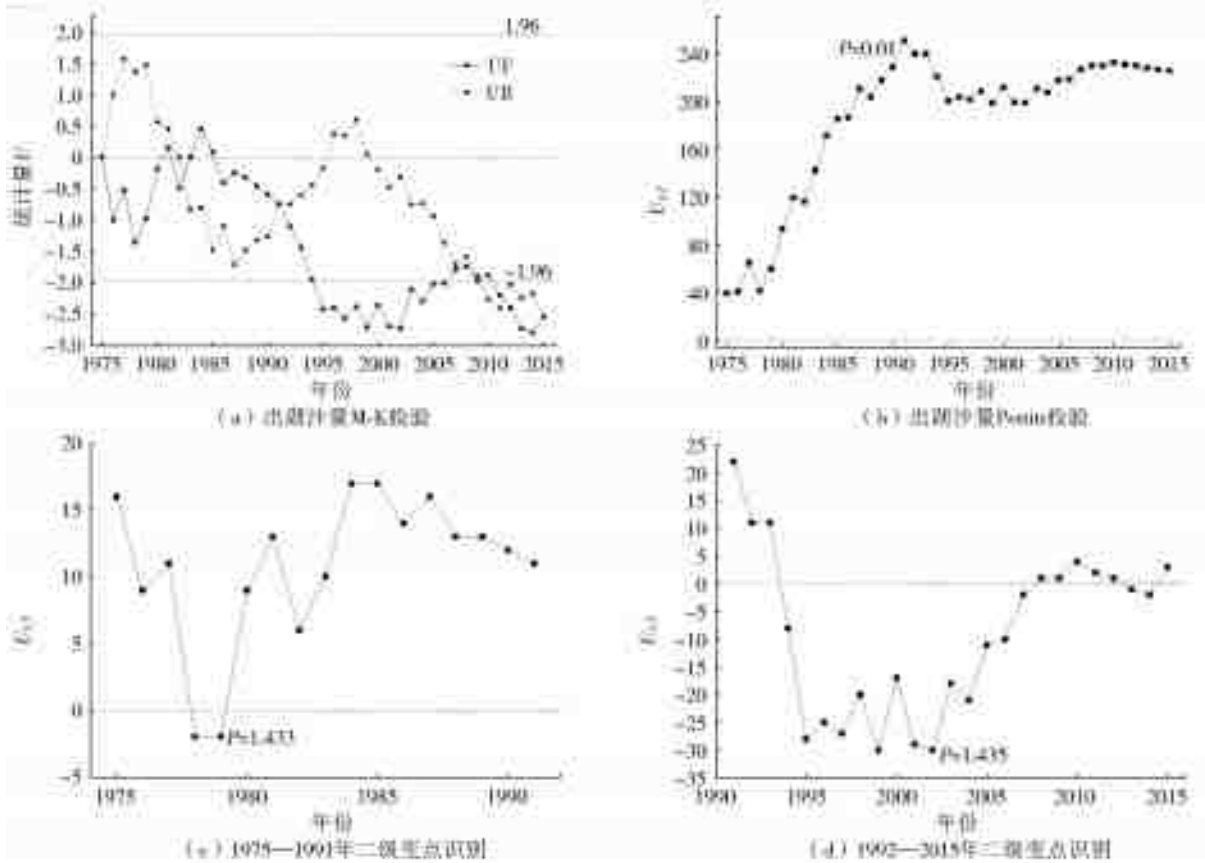


图 5 出湖沙量 M-K 突变检验和 Pettitt 一、二级变点识别

Fig. 5 M-K changing point test and Pettitt test of sediment outflows

以突变点为界,将整个研究时期划分为 1975—1991、1992—2015 年,计算洪泽湖入湖、出湖各个分区突变前后的特征值,见表 2。洪泽湖入湖沙量均值突

变前后减少了 418 t,突变后比突变前入湖沙量减少了 48.6%,出湖沙量均值突变前后减少了 262 t,突变后相较突变前出湖沙量减少了 56.1%。

表 2 入湖、出湖沙量突变分析

Tab. 2 Changing points of sediment inflows and outflows of the Hongze Lake

项目	突变点		突变前			突变后			均值差/t
	年份	显著性	均值/t	标准差/t	C.V	均值/t	标准差/t	C.V	
入湖	1991	0.05	860	546	0.64	442	406	0.92	418
出湖	1991	0.05	467	321	0.69	205	187	0.91	262

## 4 洪泽湖水沙变化成因分析

### 4.1 水量趋势变化成因分析

流域来水量变化的主要因素有降雨量和人类活

动用水量<sup>[18]</sup>。分析降雨量变化对入湖水量变化的影响,考虑到入、出湖水量变化较为一致,降雨量对出湖水量变化的影响不再赘述。由图 6(a)可以得到,降雨量和入湖水量变化较为同步,入湖水量随着

降雨量的变化而变化。1975、1983、1991、2003 和 2007 年淮河流域发生特大洪水,洪泽湖降雨水深超过 1 000 mm 时,入湖水量明显增加。1978、1986、1992、1994、2000、2001 年淮河流域降雨量减少,出现旱灾,入湖水量骤减。因降雨量减少,连续旱灾的出现,1992—2003 年入湖水量减小趋势明显,M-K 统计量值贴近 95% 临界值,变化吻合。

对多年降雨量数据进行 M-K 趋势分析,得到 1975—2015 年降雨量 M-K 统计值为-0.05,降雨量呈现不明显减小趋势,研究期间降雨量与入湖水量均呈现不明显减小趋势,变化趋势一致。文献[19-21]同时指出近 50 年淮河流域降水年际波动较为强烈,总体呈现降雨强度不明显减小趋势,研究结果相符。

1993 年前,降雨量的变化趋势与入湖水量较为吻合,降雨量对水量变化起主导作用。1993 年以后,降雨量呈增大趋势,而入湖水量呈现减小趋势,选择 1975—1993 为整个研究时段的基准期,根据回归分

析,得到基准期入湖水量和年降雨量的关系为: $Y=1.0197X-577.18(R^2=0.8171)$ 。根据降雨—径流关系推求 1993—2015 年年平均入湖水量为 327.51 亿  $m^3$ ,相较于 1975—1993 水量减少 10.92 亿  $m^3$ 。实际 1993—2015 年年平均入湖水量为 271.04 亿  $m^3$ ,相较于 1975—1993 水量减少 39.23 亿  $m^3$ 。1993—2015 年由降雨导致的入湖水量减少的贡献率为 28%,人类活动用水增加贡献率达 72%。

表 3 为 1993—2015 年淮河流域用水量数据,1993—2015 年用水量由 398.64 亿  $m^3$  增加 540.15 亿  $m^3$ ,M-K 趋势检验得到统计量  $Z=4.72$  远超过 95% 显著水平,用水量增加趋势突出。据统计 1994—2004 年,淮河流域经济增长 1.35 倍,人口增长了 800 万<sup>[22]</sup>。随着人口增长生活用水、建设生产用水、农业灌溉用水和水产养殖等活动的快速发展,水资源开发利用程度不断增加,水资源开发利用超过 60%<sup>[23]</sup>。这成为 1993 年后洪泽湖入湖水量减少的主要原因。

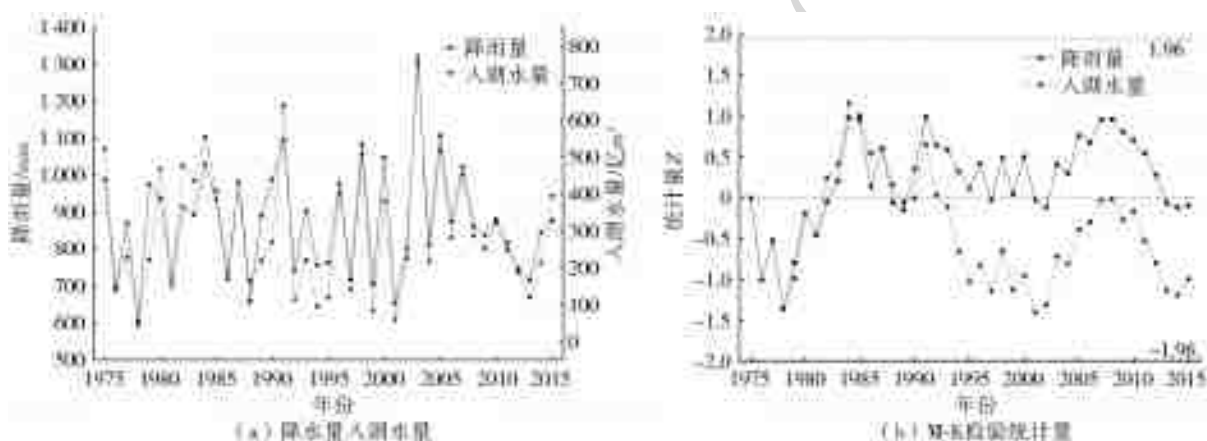


图 6 洪泽湖降水量、入湖水量图(a)和 M-K 统计量图(b)  
Fig. 6 Precipitation, sediment inflows (a) and M-K statistic (b) of the Hongze Lake

表 3 1993—2015 年淮河流域用水量

Tab. 3 Water consumption in the Huaihe basin from 1993 to 2015

年份	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
用水量/亿 $m^3$	404.35	435.98	457.1	485.32	469.54	480.53	519.19	468.98	536.8	530.41	410.87	493.19
年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
用水量/亿 $m^3$	479.63	521.62	487.07	544.22	572.12	571.69	586.05	577.01	569.76	536.73	540.15	

#### 4.2 沙量趋势变化及突变点成因分析

输沙量与流域降雨量和径流量大小相关。在上述趋势分析中,入湖、出湖水沙量增减变化趋势较为一致。但研究时段内降雨量和水量 M-K 统计值均未超过显著性水平,沙量的 M-K 统计值却存在超过 95% 显著水平的情况,呈现更为明显的减小趋势。表明除受降雨径流变化影响外,人类活动因素对输沙量变化的影响较大。

为合理开发水能资源,减少淮河流域洪涝灾害,

自 1949 年起,淮河流域进行了大规模的水库建设和开发。目前,淮河流域先后建成了 18 座大型水库,调蓄洪水库容最高可达 88.9 亿  $m^3$ <sup>[17]</sup>。统计洪泽湖以上大、中型水库库容 1975—2015 年水库容积,分析水库容积变化对洪泽湖入湖、出湖沙量变化的影响见图 7。

研究时段并非淮河流域水库建设的繁荣时期,这里按照洪泽湖上游,淮河流域大、中型水库的建成时间和库容变化对时间节点进行划分。1978 年板

桥水库开始复建,1991 年淮河流域发生特大洪水,国家确定修建 19 项治淮骨干工程,新建、复建防洪水库滞留泥沙,因此将时段划分为:1975—1978、1979—1991、1992—2015 年。1975—2015 年水库库容由 147.5 亿  $\text{m}^3$  增加到 158.54 亿  $\text{m}^3$ ,时段入湖沙量均值由 798.05 万 t 减少到 521.53 万 t,时段出湖沙量均值由 523.87 万 t 减少到 226.94 万 t。入湖沙量和出湖沙量随着修建水库总库容的增加而减少,水库滞沙对入湖、出湖沙量有显著影响。

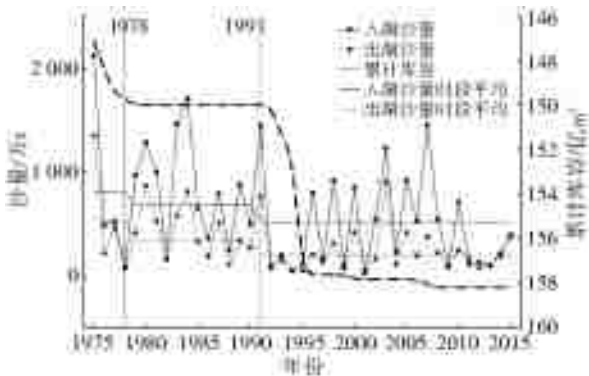


图 7 洪泽湖入湖、出湖沙量和洪泽湖上游水库总容积关系  
Fig. 7 The relationship between sediment amount and the total volume of the reservoirs in the upper reaches of the Hongze Lake

洪泽湖入湖、出湖沙量突变时间是 1991 年。1991 年淮河发生特大洪水,降雨水深为 1 032 mm,因降雨量增大,该年入湖、出湖水沙量均有明显增长。1991 年后降雨量减少,计算 1991—2015 年降雨量 M-K 统计值为  $-0.37 < 0$ ,表明 1991 年后降雨量呈减小趋势。降雨量的减小导致径流量和输沙量的减小趋势加强。另一方面,国家 1991 年颁布 19 项治淮工程,包括流域板桥水库、石漫滩水库复建,截止到 1998 年(石漫滩水库竣工)洪泽湖上游水库累计库容增加 7.69 亿  $\text{m}^3$ ,水库滞留了部分泥沙;同时,治淮骨干工程要求进一步加大水土保持工程建设,1991 年以来洪泽湖上游水土流失治理面积达 2 184  $\text{km}^2$ 。在降雨量变化和系列治淮工程的共同作用下,洪泽湖沙量在 1991 年发生突变。1975—1991 年年平均入湖沙量和出湖沙量分别为 860 t 和 467 t,1992—2015 年年平均入湖沙量和出湖沙量分别为 442 t 和 205 t,突变年前后年平均沙量减少明显。

## 5 结 论

(1)洪泽湖入湖水沙主要来自于淮河干流,洪泽湖出湖水沙主要经三河闸排入江。对洪泽湖入湖、出湖水量和沙量进行趋势分析,经过 Mann-Kendall 非参数统计检验得到 1975—2015 年洪泽湖入湖、出湖水量显著性水平  $\alpha=0.05$  的置信区间内,无

明显减小趋势;入湖沙量有小幅减小趋势,出湖沙量 M-K 统计值超过置信区间,有明显减小趋势。

(2)提出了基于 Mann-Kendall 和 Pettitt 突变点识别的组合变点检验法,组合突变检验法具有科学准确识别突变点,完善单一突变检验所存在的不能准确具体识别突变点、突变点为伪变点、突变点遗漏等的缺陷。水量趋势分析均未超过显著性水平,不具有明显趋势性变化,不存在突变点。经组合突变检验法得到沙量发生突变的年份是 1991 年。

(3)从流域降水和水资源开发利用程度方面分析洪泽湖水量变化趋势成因,1975—2015 年洪泽湖水量和降雨量变化均呈现不明显减小趋势,较为一致。1993 年以后水量呈现减小趋势主要与流域水资源开发利用程度显著增强有关。对洪泽湖入、出湖沙量变化趋势和突变点进行成因分析,洪泽湖上游水库拦沙对沙量变化的影响较为突出,在降雨量变化和系列治淮工程的推动下,1991 年洪泽湖沙量产生突变,入湖、出湖沙量明显减少。

## 参考文献(References):

- [1] 李波,濮培民,韩爱民. 洪泽湖水质的因子分析[J]. 中国环境科学,2003,23(1):69-73. (LI B, PU P M, HAN A M. Factor analysis of water quality in Hongze Lake [J]. China Environmental Science, 2003, 23(1): 69-73. (in Chinese))
- [2] 叶正伟. 近 60 年洪泽湖流域汛期降水特征及其与 EASM 关系[J]. 地理科学,2012, 32(11): 1358-1363. (YE Z W. Precipitation change in flood season and its relationship with EASM in the Hongze Lake catchments in recent 60 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(11): 1358-1363. (in Chinese)) DOI: 10. 13249/j. cnki. sgs. 2012. 11. 019.
- [3] 叶正伟,李宗花. 1951 年来洪泽湖流域雨量变化特征与趋势分析[J]. 长江流域资源与环境 2010, 19(12): 1392-1396. (YE Z W, LI Z H. Characteristics and trends of areal precipitation in the Hongze Lake catchment since 1951 [J]. Resour Environ Yangtze Basin, 2010, 19(12): 1392-1396. (in Chinese)) DOI: 10. 13249/j. cnki. sgs. 2012. 11. 019.
- [4] 李波,濮培民. 淮河流域及洪泽湖水质的演变趋势分析[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(1): 67-73. (LI B, PU P M. Study on the evolution tendency of water quality in Huaihe River basin and Hongze Lake [J]. Resour Environ Yangtze Basin, 2003, 12(1): 67-73. (in Chinese))
- [5] 宋玉,李致家,杨涛. 分布式水文模型在淮河洪泽湖以上流域洪水预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2006, 34(2): 127-131. (SONG Y, LI Z J, Yang T. Application of distributed hydrological model to flood forecasting for upper reaches of the Huaihe River



- above Hongze Lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, 34(2): 127-131. (in Chinese)
- [6] 姜加虎,袁静秀. 洪泽湖历史洪水分析(1736—1992年)[J]. 湖泊科学, 1997(3): 231-236. (JIANG J H, YUAN J X. Analysis on the historical flood of Hongze Lake (1736-1992)[J]. Journal of Lake Sciences, 1997(3): 231-236. (in Chinese))
- [7] 楚恩国. 洪泽湖流域水文特征分析. 水科学与工程学报[J]. 2008(3): 22-25. (CHU E G. Analysis of hydrological characteristics of Hongze Lake basin[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2008(3): 22-25. (in Chinese))
- [8] 虞邦义,郁玉锁. 洪泽湖泥沙淤积分析. 泥沙研究, 2010(6): 38-43. (YU B Y, YU Y S. Sediment deposition in Hongze Lake[J]. Journal of Sediment Research, 2010(6): 38-43 (in Chinese)) DOI: 10. 16239/j. cnki. 0468-155x. 2010. 06. 005.
- [9] 齐凌艳,黄佳聪,高俊峰,等. 洪泽湖叶绿素 a 浓度的时空变化特征[J]. 湖泊科学, 2016, 28(3): 583-591. (QI L Y, HUANG J C, GAO J F, et al. Spatial-temporal variation characteristics of chlorophyll-a concentration in Lake Hongze[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(3): 583-591. (in Chinese)) DOI: 10. 18307 /2016. 0314.
- [10] 邓恒,徐国宾,段宇,等. 淮河与洪泽湖河湖关系研究进展及展望[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 139-144. (DENG H, XU G B, DUAN Y, et al. Research progress and prospects of the relationship between Huaihe River and Hongze Lake[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(5): 139-144. (in Chinese))
- [11] DONALD H B, MOHAMED A H E. Detection of hydrologic trends and variability[J]. Journal of Hydrology, 2002, 55: 107-122.
- [12] OMAR I A A, DONALD H B. Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River basin[J]. Journal of Hydrology, 2006, 319: 282-294.
- [13] 高伟,陈岩,徐敏,等. 抚仙湖水质变化(1980—2011年)趋势与驱动力分析[J]. 湖泊科学, 2013, 25(5): 635-642. (GAO W, CHEN Y, XU M et al. Trend and driving factors of water quality change in Lake Fuxian (1980- 2011)[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(5): 635-642. (in Chinese)) DOI: 10. 18307/2013. 0503.
- [14] 杨雪,杨东,安丽娜,等. 1961—2013年吉林省气温与降水变化特征[J]. 中国农学通报, 2016, 32(29): 139-146. (YANG X, YANG D, AN L N, et al. Variation characteristics of temperature and precipitation in Jilin from 1961 to 2013[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(29): 139-146. (in Chinese))
- [15] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第2版)[M]. 北京:气象出版社, 2007. (WEI F Y. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology (Second Edition)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007. (in Chinese))
- [16] 李文文,傅旭东,吴文强,等. 黄河下游水沙突变特征分析[J]. 水力发电学报, 2014, 33(1): 108-113. (LI W W, FU X D, WU W Q, et al. Study on runoff and sediment process variation in the lower Yellow River[J]. J Hydroelectr Eng, 2014, 33(1): 108-113. (in Chinese))
- [17] 史红玲,胡春宏,王延贵,等. 淮河流域水沙变化趋势及其成因分析[J]. 水利学报, 2012, 43(5): 571-579. (SHI H L, HU C H, WANG Y G, et al. Multi-objective reservoir regulation model based on simulation rules and intelligent optimization and its application[J]. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2012. 05. 007.
- [18] 罗蔚,张翔,邓志民,等. 1956—2008年鄱阳湖流域水沙输移趋势及成因分析[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 658-667. (LUO W, ZHANG X, DENG Z M, et al. Runoff and sediment load transport and cause analysis in Poyang Lake basin over the period 1956-2008[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5): 658-667 (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2014. 05. 008.
- [19] 孙鹏,孙玉燕,张强,等. 淮河流域径流过程变化时空特征及成因[J]. 湖泊科学, 2018, 30(2): 497-508. (SUN P, SUN Y Y, ZHANG Q, et al. Temporal and spatial variation characteristics of runoff processes and its causes in Huaihe basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(2): 497-508. (in Chinese)) DOI 10. 18307 /2018. 0221.
- [20] 陈峪,高歌,任国玉,等. 中国十大流域近 40 多年降水量时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2005, 20(5): 637-643. (CHEN Y, GAO G, REN G Y, et al. Spatial and temporal variation of precipitation over ten Major Basins in China between 1956 and 2000[J]. Journal of Natural Resources Policy Research, 2005, 20(5): 637-643. (in Chinese))
- [21] 王珂清,曾燕,谢志清,等. 1961—2008年淮河流域气温和降水变化趋势[J]. 气象科学, 2012, 32(6): 671-677. (WANG K Q, ZENG Y, XIE Z Q, et al. Change trend of temperature and precipitation in Huaihe River basin from 1961 to 2008[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2012, 32(6): 671-677. (in Chinese)) DOI: 10. 3969 /2012jms. 0061.
- [22] 楚恩国. 洪泽湖水资源现状分析及对策[J]. 中国水利, 2007(23): 33-35. (CHU E G. Analysis and countermeasures of water resources in Hongze Lake[J]. China Water Resources, 2007(23): 33-35. (in Chinese))
- [23] 蒋艳,彭期冬,骆辉煌,等. 淮河流域水质污染时空变异特征分析[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1283-1288. (JIANG Y, PENG Q D, LUO H H, et al. Analysis of spatial and temporal variation of water quality in Huaihe River basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(11): 1283-1288. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2011. 11. 010.