

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2022.0019

陈隆吉,李达,侯玮,等. 淮河干流洪峰流量变化特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2022,20(1):171-179. CHEN L J, LI D, HOU W, et al. Characteristics of the flood peak discharge change of the mainstream of Huaihe River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(1):171-179. (in Chinese)

## 淮河干流洪峰流量变化特征

陈隆吉<sup>1</sup>,李达<sup>2</sup>,侯玮<sup>3</sup>,潘汀超<sup>2</sup>

(1. 温州市水文管理中心,浙江 温州 325000;2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300350;  
3. 河北工程大学矿业与测绘工程学院,河北 邯郸 056000)

**摘要:**以淮河流域王家坝、鲁台子、吴家渡和小柳巷4个水文站年最大洪峰流量序列为研究对象,采用 Kendall 秩次检验法、Spearman 秩次检验法和线性趋势回归检验法、Mann-Kendall 检验法、有序聚类、滑动秩和检验法以及小波分析等方法,分析淮河干流典型站点多年洪水系列趋势、突变、周期变化特征。结果表明:该区域的年最大洪峰流量有较大变化,上游的偏差系数总体比下游大,即上游序列离散程度较大,其中,王家坝、鲁台子站点呈现不显著下降趋势,吴家渡、小柳巷站点呈现不显著上升趋势;王家坝站点突变点为1985、1993和2010年,鲁台子站点突变点为1957、2002和2014年,吴家渡站点突变点为1995年,小柳巷站点突变点为1995年;王家坝站主要有3~8 a、8~14 a、14~22 a和22~32 a这4种尺度的周期,鲁台子站主要有5~13 a和15~32 a两种尺度的周期,吴家渡站主要有5~18 a和20~32 a两种尺度的周期,小柳巷站主要有4~7 a、10~15 a和17~25 a这3种尺度的周期。研究结果可为淮河流域防洪规划提供重要依据。

**关键词:**淮河干流;洪峰流量;变化趋势;突变特征;周期分析

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



淮河位于中国东部,是中国七大江河之一。淮河流域历次大洪水都威胁了人民群众的生命财产安全。根据1950—2010年的洪灾统计数据,安徽省淮河流域水灾成灾面积超过100万hm<sup>2</sup>的有5 a,水灾成灾面积超过50万hm<sup>2</sup>的有9 a,61 a内年平均水灾成灾面积21.72万hm<sup>2</sup>,占2010年安徽省耕地面积的5%<sup>[1-2]</sup>。为了降低洪灾损失,1991—2007年淮河流域开展了19项治淮工程,2013年之后相继开展了38项治淮工程,防洪减灾工程建设取得举世瞩目的成就,产生了巨大的社会效益和经济效益。

在气候变化和人类活动影响下,淮河干流洪水特性发生了不同程度的变化,分析淮河干流洪水变

化特征能为淮河流域防洪规划提供重要依据。近年来,国内外学者在径流变化特征方面展开了大量的研究工作:卢晓宁等<sup>[3]</sup>用Mann-Kendall非参数检验法发现1985年以后霍林河流域径流量呈较强的增长趋势,突变发生在1985年和1990年;丁爱中等<sup>[4]</sup>应用Mann-Kendall检验法、Pettitt检验法、滑动T检验和小波分析法等方法,发现永定河流域年径流量一直处于显著下降趋势中,存在27(28)a的第一主周期和20(21)a的第二主周期,1982—1983年径流量发生突变;邹悦等<sup>[5]</sup>运用差积曲线-秩检验联合法,并结合Brown-Forsythe法、有序聚类法、滑动F检验法,发现黑河流域莺落峡水文站变异点为1959年和1979年;李艳等<sup>[6]</sup>发现北江流域1992—

收稿日期:2021-06-11 修回日期:2021-10-10 网络出版时间:2021-10-22

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20211022.1402.004.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0405601);高等学校学科创新引智计划项目(B14012);科技部重点领域创新团队项目(2014RA4031);重大水利工程安全与防灾创新团队项目

作者简介:陈隆吉(1969—),男,浙江温州人,高级工程师,从事水文水资源管理工作。E-mail:1538033954@qq.com

通信作者:李达(1997—),男,河北廊坊人,从事防洪减灾及水利信息化研究。E-mail:ld\_tj@qq.com

2006年的径流量序列和1973—2006年的径流量序列相对于1956—1972年的径流量序列都发生了变异;张少文等<sup>[7]</sup>用小波分析法揭示了黄河青铜峡年径流具有128、64、32 a周期性变化;曹建荣等<sup>[8]</sup>基于小波变换和Butterworth滤波器,发现黄河上游月径流不仅存在1 a的短周期变化,还分别存在3.9、7.8、18.5 a的长周期变化;王翠柏等<sup>[9]</sup>采用EMD方法揭示了钱塘江闻家堰水文站还原后的天然年径流量时序分别具有准2~3 a、准4~5 a、准8 a和准15 a的变化周期。在众多学者采用的方法中,趋势分析主要采用线性回归<sup>[10]</sup>等方法,同时也有斯波曼秩相关法、Mann-Kendall秩相关法<sup>[11-12]</sup>等非参数检验方法。突变分析方法主要包括Mann-Kendall法<sup>[13-14]</sup>、贝叶斯变点分析模型<sup>[15-16]</sup>、R/S分析方法<sup>[17-18]</sup>、两阶段线性回归<sup>[19]</sup>和Pettitt检验法<sup>[20]</sup>。周期分析方法包括离散的周期图、方差分析和连续谱分析、小波分析、EMD多时间尺度分析等。对于淮河流域的径流变化特征分析,孙鹏等<sup>[21]</sup>利用非参数Mann-Kendall趋势检验和小波转换等方法发现淮河中上游径流量整体呈下降趋势。孙玉燕<sup>[22]</sup>通过非参数Mann-Kendall趋势检验和小波转换等方法发现班台、王家坝、鲁台子和蚌埠站在21世纪初存在2.0~3.4 a尺度的小周期。

目前径流研究采用的趋势与突变分析方法较为单一,且多为对径流量的研究,本文以淮河流域王家坝、鲁台子、吴家渡和小柳巷4个水文站年最大洪峰流量序列为研究对象,采用Kendall秩次检验法、Spearman秩次检验法和线性趋势回归检验法、Mann-Kendall检验法、有序聚类、滑动秩和检验法

以及小波分析多种方法,以期获得对淮河干流典型站点多年洪水系列趋势、突变、周期变化特征的相关成果,与已有的径流量特征分析形成对照,共同为淮河流域防洪规划提供支撑。

## 1 研究区域概况

淮河流域跨山东、安徽、江苏、河南和湖北5省,总面积27万km<sup>2</sup>,干流全长1000 km,研究区为淮河中上游流域,见图1。流域降雨量多年平均值为880 mm,多年径流深平均值约230 mm,流域内70%的年径流量集中在汛期。淮河干流洪水持续时间长且水量大。淮河干流河道形似锅底,一旦遭遇暴雨,极易形成高水位长历时状况,发生“关门淹”,流域洪涝灾害频发。历史上1954、1991、2003和2007年都发生了流域性洪水灾害,其中1954年的洪水灾害是新中国成立后规模最大的洪水,历时极长,淮河干流超警戒水位超过100 d,灾害极为严重。2003年淮河洪水规模仅次于1954年,干流主要堤防共发生险情1627处,流域内4900多万人受灾,直接经济损失约为300多亿元。1991年、2007年淮河大洪水受灾人口分别为3000多万人和2600多万人,直接经济损失分别达40多亿元和170多亿元。目前,淮河水系已建成水库3000多座,总库容187亿m<sup>3</sup>,利用洼地建成蓄滞洪区和湖泊型水库12处,总库容266.28亿m<sup>3</sup>,主要堤防长8070 km,其中淮北大堤、洪泽湖大堤、里运河大堤等I级堤防长1240 km,II级堤防长1408 km。各种水利工程的修建等人类活动与气候变化对淮河干流洪水特性产生了不同程度的影响。



图1 研究区  
Fig. 1 Study area

淮河干流王家坝站是流域上游总控制站,集水面积30630 km<sup>2</sup>,为淮河上中游分界点;鲁台子站是

淮河中游重要水文站,位于淮河正阳关下游约13 km处,正阳关是淮河中上游洪水的汇集地,几乎

包括了淮河干流的所有山区来水;吴家渡站位于淮河中游,控制流域面积为 121 300 km<sup>2</sup>,流域内支流众多,是淮河干流的重要控制站;淮河干流到下游出现分支,分 3 路下泄,小柳巷站为中下游分支前的结点,集水面积 124 000 km<sup>2</sup>,对于淮河干流的洪水特

性具有代表性。以上 4 个水文站的年最大洪峰流量统计特征见表 1。由表 1 可知该区域的年最大洪峰流量有比较大的变化,而且年最大洪峰流量序列最大值和均值都从上游沿下游降低,上游的偏差系数总体比下游大,即上游序列离散程度较大。

表 1 淮河流域 4 个水文站年最大洪峰流量统计特征值

Tab. 1 Statistical characteristic value of annual maximum peak discharge of 4 hydrological stations in the Huaihe River basin

站名	系列长度	均值/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	变差系数	最大值/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	最小值/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
王家坝	1964—2018 年	3 508.36	0.75	16 000	354
鲁台子	1950—2018 年	4 159.93	0.59	12 500	751
吴家渡	1950—2018 年	4 371.90	0.50	11 600	838
小柳巷	1982—2018 年	4 395.83	0.51	8 540	866

## 2 研究方法

本文采用 Kendall 秩次检验法、Spearman 秩次检验法和线性趋势回归检验法对淮河流域王家坝、鲁台子、吴家渡和小柳巷 4 个水文站年最大洪峰流量序列的趋势性进行分析,通过构建和计算统计量  $|U|$ 、 $|T|$  与相应的临界值,比较后判断水文站年最大洪峰流量的变化趋势是否显著。

采用世界气象组织推荐的 Mann-Kendall 检验法<sup>[23]</sup>、有序聚类、滑动秩和检验法对水文站年最大洪峰流量序列进行突变分析,通过构建和计算统计量与相应的临界值,比较后判断水文站年最大洪峰流量的突变是否显著。

采用 Morlet 小波分析水文站年最大洪峰流量的周期变化特征。小波分析方法是 20 世纪 80 年代发展起来的一种信号时频局部化分析的新方法,被认为是调和学科分支在近半个世纪以来工作的

结晶<sup>[7]</sup>,是傅立叶分析、数值分析、样条理论等多学科交叉的结果<sup>[24]</sup>,原理是序列可用小波函数逼近。其中的小波变换系数  $W_f(a, b)$  能反映函数  $f(t)$  随时域参数  $b$  和频域参数  $a$  变化的特性:当  $a$  较小时观察的视野窄对时域的分辨率较高,而对频域的分辨率较低,可以作细节观察;当  $a$  较大时观察的视野宽对时域的分辨率较低,而对频域的分辨率较高,可以作概貌的观察。这种多尺度分析的思想也称多分辨率分析思想<sup>[25-26]</sup>。

## 3 淮河干流洪水年际变化特征分析

### 3.1 淮河干流洪水序列整体趋势分析

利用 Kendall 秩次检验、Spearman 秩次检验和线性趋势回归检验等方法对淮河流域王家坝、鲁台子、吴家渡和小柳巷 4 个水文站年最大洪峰流量序列进行趋势检验,结果见表 2。

表 2 淮河流域 4 水文站年最大洪峰流量趋势检验

Tab. 2 The trend test of the annual maximum peak discharge of 4 hydrological stations in the Huaihe River basin

站名	系列长度	Kendall 秩次检验 $ U $ 值	Spearman 秩次检验 $ T $ 值	线性趋势回归检验 $ T $ 值	变化速率/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )
王家坝	1964—2018 年	1.31	1.23	1.49	-33.08
鲁台子	1950—2018 年	0.39	0.42	1.64	-4.14
吴家渡	1950—2018 年	1.84	1.66	1.05	16.88
小柳巷	1982—2018 年	0.44	0.55	0.67	22.24

由表 2 可知:王家坝站点年最大洪峰流量呈现下降趋势,变化速率为 -33.08 m<sup>3</sup>/(s·a),Kendall 秩次检验值 1.31 < 1.96, Spearman 秩次检验值 1.23 < 1.64,线性趋势回归检验值 1.49 < 1.64;鲁台子站点年最大洪峰流量呈现下降趋势,变化速率为 -5.4 m<sup>3</sup>/(s·a),Kendall 秩次检验值 0.39 < 1.96, Spearman 秩次检验值 0.42 < 1.64,线性趋势回归检验值 0.25 < 1.64;吴家渡站点年最大洪峰流

量呈现上升趋势,变化速率为 16.88 m<sup>3</sup>/(s·a),Kendall 秩次检验值 1.84 < 1.96, Spearman 秩次检验值 1.66 > 1.64,线性趋势回归检验值 1.05 < 1.64;小柳巷站点年最大洪峰流量呈现上升趋势,变化速率为 22.24 m<sup>3</sup>/(s·a),Kendall 秩次检验值 0.44 < 1.96, Spearman 秩次检验值 0.44 < 1.64,线性趋势回归检验值 0.67 < 1.64。各站点统计量都没有通过显著水平为 0.05 的信度检验,说

明其变化趋势不显著。

### 3.2 淮河干流洪水序列突变分析

利用 Mann-Kendall 检验、有序聚类、滑动秩和

检验法等方法对淮河流域王家坝、鲁台子、吴家渡和小柳巷 4 个水文站年最大洪峰流量序列进行突变分析,分析结果见图 2 至图 4。

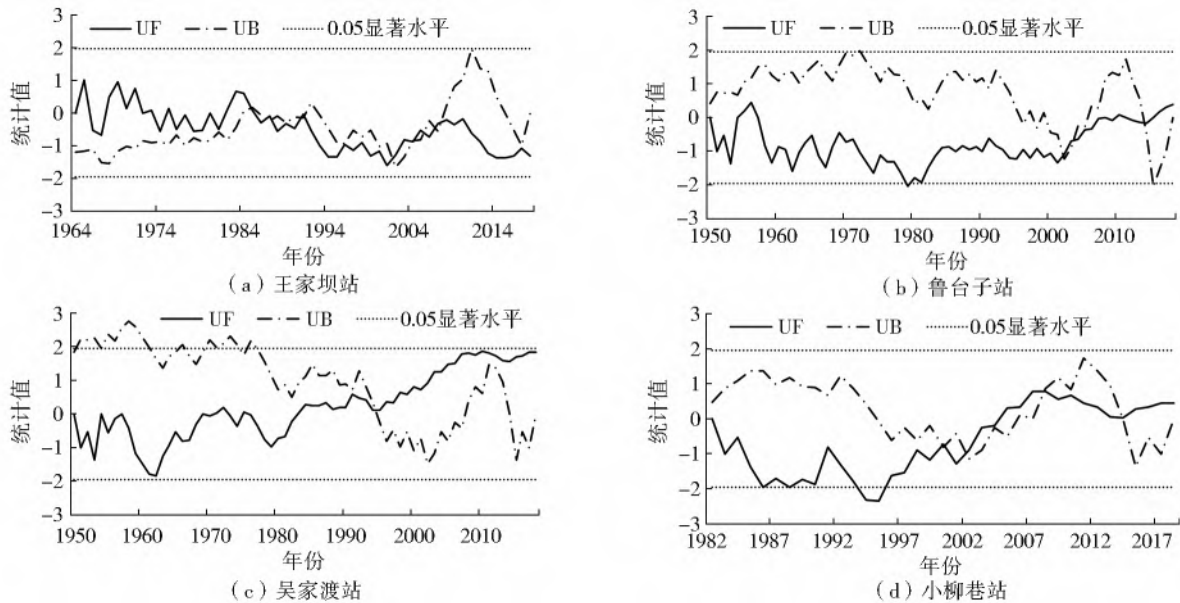


图 2 各站点年最大洪峰流量 Mann-Kendall 检验统计量变化曲线

Fig. 2 Variation curves of Mann-Kendall test statistics of annual maximum peak discharge at each station

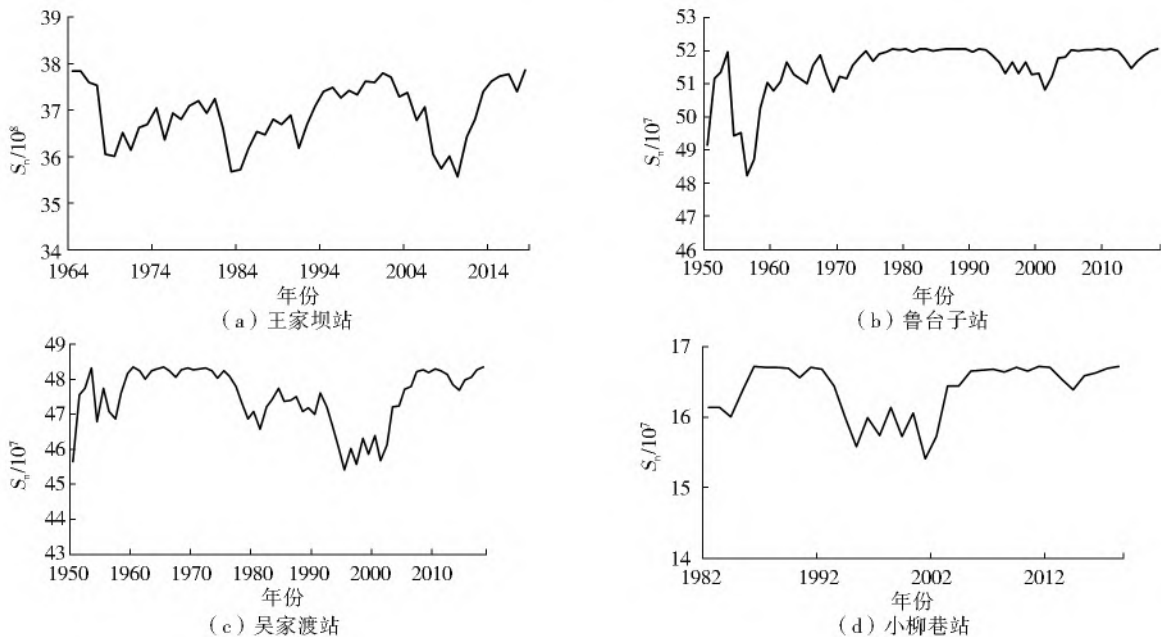


图 3 各站点年最大洪峰流量有序聚类曲线

Fig. 3 Sequential cluster curves of annual maximum peak discharge at each station

由图 2 至图 4 分析可知:王家坝站点年最大洪峰流量序列 Mann-Kendall 统计值 UF 和 UB 曲线存在多处相交,利用有序聚类法和滑动秩和检验法综合判断这些交点中的突变点,结果见图 3(a)和图 4(a),表明突变点为 1985、1993 和 2010 年,其中 1985 年突变后王家坝站点年最大洪峰流量序列变化趋势由增加变成降低,1993 年和 2010 年则发生骤降的突变。UF 值在 1964—1965 年、1968—1973

年和 1982—1985 年均均为正,但没有超过临界值 1.96,UF 值在 1966—1967 年、1974—1981 年以及 1986 年之后均为负,但没有低于临界值 -1.96,均没有超过 0.05 显著性水平,说明各时期趋势不显著,即王家坝站点年最大洪峰流量序列的特性比较稳定。鲁台子站点结果见图 3(b)、图 4(b),突变点为 1957、2002 和 2014 年,其中,1957 年突变后鲁台子站点年最大洪峰流量序列变化趋势由增加变成降

低,2002年突变后鲁台子站点年最大洪峰流量序列下降趋势变缓,2014年突变后鲁台子站点年最大洪峰流量序列变化趋势由降低变成增加。UF值在1954—1957年和2015—2018年均为正,但没有超过临界值1.96,即没有超过0.05显著性水平,说明该时期鲁台子站点年最大洪峰流量存在增加趋势,但不显著;UF值在1950—1953年和1958—2014年均均为负,其中1979年UF值为-2.05,低于临界值-1.96,说明该时期鲁台子站点年最大洪峰流量存在显著的降低趋势。吴家渡站点结果见图3(c)和图4(c),表明突变点为1995年,1995年后发生骤

增的突变。UF值在1983年以后均为正,但没有超过临界值1.96,UF值在1982年以前均为负但没有低于临界值-1.96,均没有超过0.05显著性水平,说明各时期趋势不显著,即吴家渡站点年最大洪峰流量序列的特性比较稳定。小柳巷站点结果见图3(d)和图4(d),表明突变点为1995年,1995年后发生骤增的突变。UF值在2015年以后均为正但没有超过临界值1.96,UF值在2014年以前均为负但没有低于临界值-1.96,均没有超过0.05显著性水平,说明各时期趋势不显著,即小柳巷站点年最大洪峰流量序列的特性比较稳定。

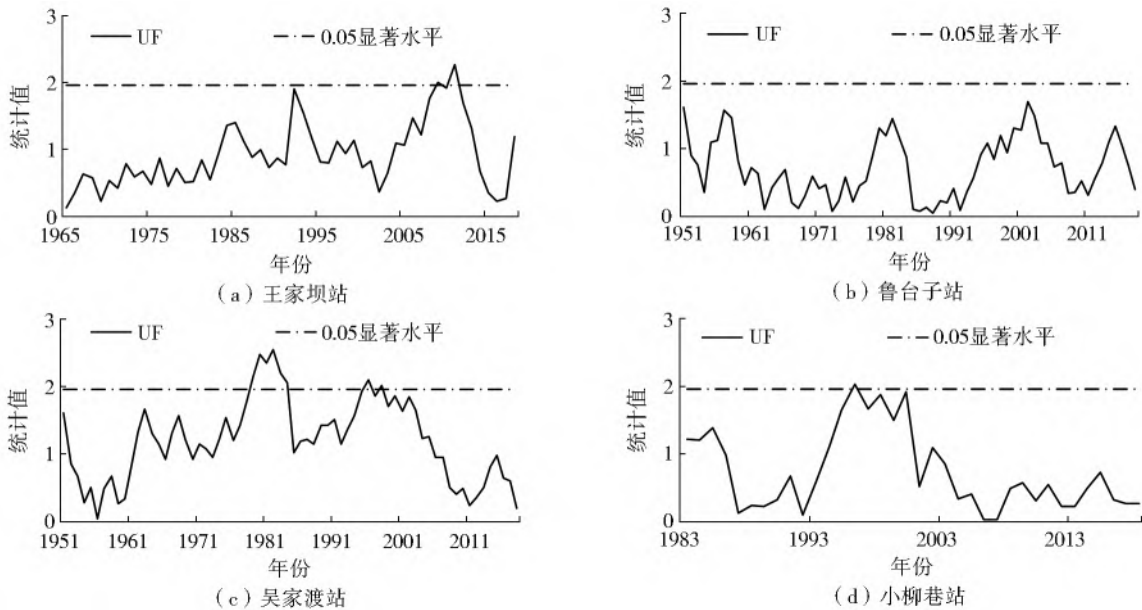


图4 各站点年最大洪峰流量滑动秩和检验统计量变化曲线

Fig. 4 Variation curves of the rank sum test statistic of the annual maximum peak discharge at each station

分析发现,淮河中上游年最大洪峰流量变化整体较为平稳并偏于下降,与孙鹏等<sup>[21]</sup>、孙玉燕<sup>[22]</sup>等利用非参数Mann-Kendall趋势检验发现淮河中上游径流量整体呈下降趋势的结果基本一致,表明淮河中上游的年最大洪峰流量与年径流量呈现了相同的变化趋势。

### 3.3 淮河干流洪水序列周期分析

采用Morlet小波分析淮河流域王家坝、鲁台子、吴家渡和小柳巷4个水文站年最大洪峰流量的周期变化特征。Morlet小波变换系数实部等值线见图5, Morlet小波方差图见图6。对图5和图6进行分析可知如下结果。

王家坝站年最大洪峰流量年际周期变化特征明显,主要有3~8 a、8~14 a、14~22 a和22~32 a这4种时间尺度的周期,见图5(a)。在3~8 a时间尺度上洪峰流量变化周期性不显著,中心大约在6 a;在8~14 a、14~22 a时间尺度上洪峰流量周期变化比较

明显,中心分别大约在10 a和19 a;在22~32 a时间尺度上洪峰流量周期震荡比较明显,中心大约在27 a。王家坝站年最大洪峰流量小波方差曲线明显峰值有4个,分别为27、19、10、6 a,见图6(a)。王家坝站年最大洪峰流量小波方差峰值是27 a,为第一主周期,周期震荡最剧烈。19、10、6 a分别为王家坝站年最大洪峰流量变化的第二、第三、第四主周期。

鲁台子站年最大洪峰流量年际周期变化特征明显,主要有5~13 a和15~32 a这2种时间尺度的周期,见图5(b)。在5~13 a时间尺度上洪峰流量变化周期性不显著,中心大约在10 a;在15~32 a时间尺度上洪峰流量周期变化比较明显,中心大约在26 a。鲁台子站年最大洪峰流量小波方差曲线明显峰值有2个,分别为26 a和10 a,见图6(b)。鲁台子站年最大洪峰流量小波方差峰值是26 a,为第一主周期,周期震荡最剧烈。10 a为鲁台子站年最大洪峰流量变化的第二主周期。

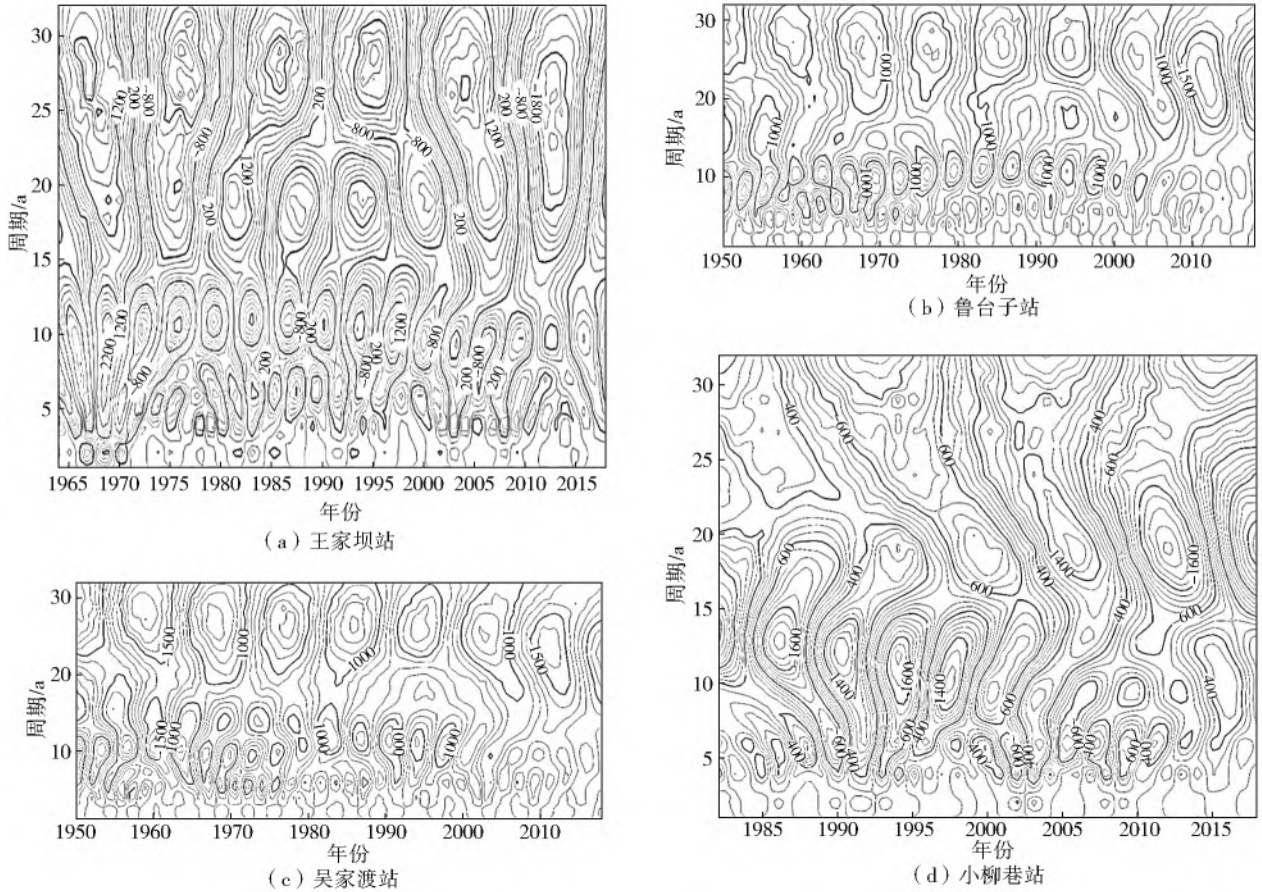


图 5 各站点年最大洪峰流量小波变化系数实部等值线

Fig. 5 Real part contours of wavelet variation coefficient of the maximum annual peak discharge at each station

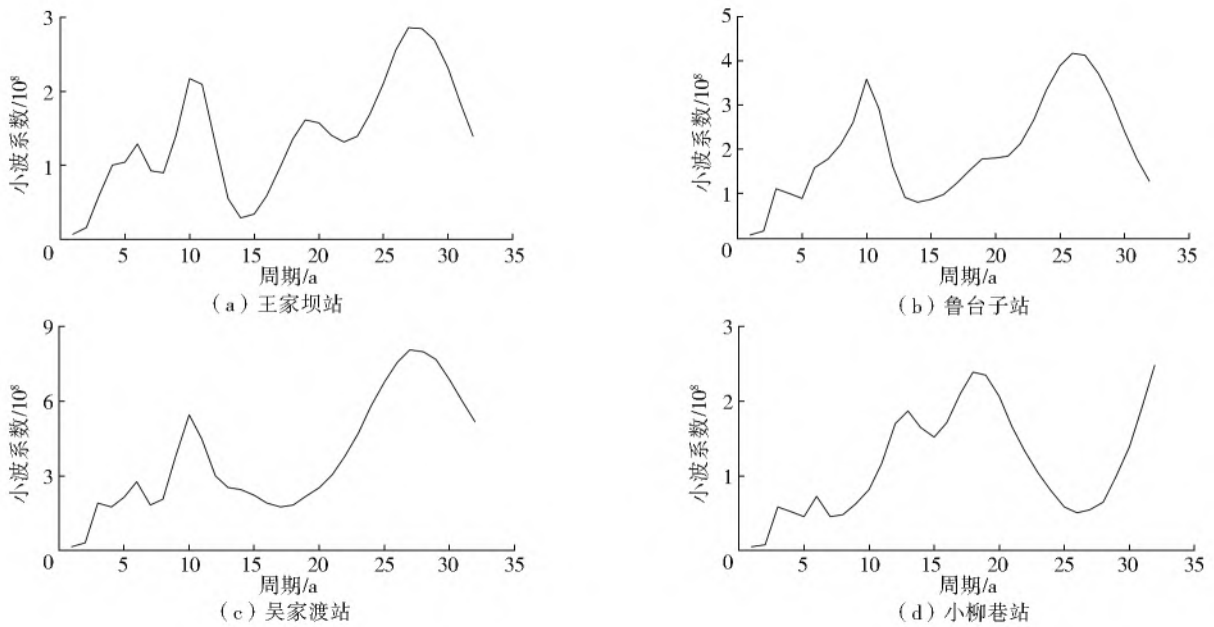


图 6 各站点年最大洪峰流量小波方差

Fig. 6 Wavelet variances of the maximum annual peak discharge at each station

吴家渡站年最大洪峰流量年际周期变化特征明显,主要有 5~18 a 和 20~32 a 这 2 种时间尺度的周期,见图 5(c)。在 5~18 a 时间尺度上洪峰流量变化周期性不显著,中心大约 10 a;在 20~32 a 时间尺度上洪峰流量周期变化比较明显,中心大约在

27 a。吴家渡站年最大洪峰流量小波方差曲线明显峰值有 2 个,分别为 27 a 和 10 a,见图 6(c)。吴家渡站年最大洪峰流量小波方差峰值是 27 a,为第一主周期,周期震荡最剧烈。10 a 为吴家渡站年最大洪峰流量变化的第二主周期。

小柳巷站年最大洪峰流量年际周期变化特征明显,主要有4~7 a、10~15 a和17~25 a这3种时间尺度的周期,见图5(d)。在4~7 a时间尺度上洪峰流量变化周期性不显著,中心大约6 a;在10~15 a、17~25 a时间尺度洪峰流量周期变化比较明显,中心分别大约在13 a和18 a。小柳巷站年最大洪峰流量小波方差曲线明显峰值有3个,分别为18、13、6 a,见图6(d)。小柳巷站年最大洪峰流量小波方差峰值是18 a,为第一主周期,周期震荡最剧烈。13 a和6 a分别为王家坝站年最大洪峰流量变化的第二和第三主周期。

对各站点过去30~60 a的洪峰流量序列进行周期分析,并未在相同时间段检测出与孙鹏等<sup>[21]</sup>和孙玉燕<sup>[22]</sup>等利用非参数Mann-Kendall趋势检验和小波转换等方法发现王家坝、鲁台子和蚌埠站年径流量在21世纪初存在2.0~3.4 a时间尺度小周期相同的结果,主要原因为淮河径流年内分布存在较大差异性<sup>[21]</sup>,年径流量是包含一年四季的参数,而年最大洪峰流量则基本位于汛期,不受其他季节的影响,因而两者之间的周期变化表现出了一定的差异。由此可见,年最大洪峰流量的变化特征并不能完全通过对年径流量的分析类比得出,本文以年最大洪峰流量为研究对象,可以为淮河干流汛期防洪形势研判与风险管理提供更为可靠的依据。

## 4 结 论

本文综合运用统计学方法,以淮河流域王家坝(1964—2018年)、鲁台子(1950—2018年)、吴家渡(1950—2018年)和小柳巷(1982—2018年)4个水文站年最大洪峰流量序列为研究对象,对淮河干流洪水的年际变化特征进行分析,重点研究系列趋势、突变、周期变化特征,得到如下结论。

王家坝站点突变点为1985年、1993年和2010年,1964—1965年、1968—1973年和1982—1985年王家坝站点存在不显著增加趋势,1966—1967年、1974—1981年以及1986年王家坝站点存在不显著降低趋势,总体保持稳定,王家坝站主要有3~8 a、8~14 a、14~22 a和22~32 a这4种时间尺度周期。

鲁台子站点突变点为1957年、2002年和2014年,1954—1957年和2015—2018年鲁台子站点存在不显著增加趋势,1979年存在显著降低趋势,其余年份为不显著降低,鲁台子站主要时间尺度周期为5~13 a和15~32 a。

吴家渡站点突变点为1995年,1983年以后吴家渡站点存在不显著增加趋势,1982年以前吴家渡站点存在不显著降低趋势,总体保持稳定,吴家渡站主要时间尺度周期为5~18 a和20~32 a。

小柳巷站点突变点为1995年,2015年以后小柳巷站点存在不显著增加趋势,2014年以前小柳巷站点存在不显著降低趋势,总体保持稳定,小柳巷站主要时间尺度周期为4~7 a、10~15 a和17~25 a。

## 参考文献(References):

- [1] 李振华,朱锦红,蔡静宁,等.历史上的淮河洪水[J].气象,2005,31(6):24-28. (LI Z H, ZHU J H, CAI J N, et al. Flood in Huaihe valley since 1470[J]. Meteorological Monthly, 2005, 31(6): 24-28. (in Chinese)) DOI:10.7519/j.issn.1000-0526.2005.06.005.
- [2] 郝朝德.安徽省淮河洪水的回忆[J].治淮,2011(11):7-10. (HAO Z D. Memories of the Huaihe flood in Anhui Province[J]. Zhihuai, 2011(11): 7-10. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1001-9243.2011.11.003.
- [3] 卢晓宁,邓伟,栾卉,等.近50年来霍林河流域径流量演变规律研究[J].干旱区资源与环境,2005(S1):90-95. (LU X N, DENG W, LUAN H, et al. Rules of runoff variation of Huolinhe River in the past 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005(S1):90-95. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1003-7578.2005.z1.019.
- [4] 丁爱中,赵银军,郝弟,等.永定河流域径流变化特征及影响因素分析[J].南水北调与水利科技,2013,11(1):17-22. (DING A Z, ZHAO Y J, HAO D, et al. Analysis of variation characteristics of runoff and their influencing factors in the Yongding River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(1): 17-22. (in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1201.2013.01017.
- [5] 邹悦,张勃,戴声佩,等.黑河流域莺落峡站水文过程变异点的识别与分析[J].资源科学,2011,33(7):1264-1271. (ZOU Y, ZHANG B, DAI S P, et al. Identification and analysis of mutations of hydrological processes at the Yingluoxia Station in the Heihe River basin[J]. Resources Science, 2011, 33(7): 1264-1271. (in Chinese)) DOI:CNKI:SUN:ZRZY.0.2011-07-009.
- [6] 李艳,陈晓宏,张鹏飞.北江流域水文特征变异研究[J].自然资源学报,2013,28(5):822-831. (LI Y, CHEN X H, ZHANG P F. Research of hydrological characteristic variation in Beijiang River basin[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(5): 822-831. (in Chinese)) DOI:10.11849/zrzyxb.2013.05.011.
- [7] 张少文,丁晶,廖杰,等.基于小波的黄河上游天然年径

- 流变化特性分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004(3):32-37. (ZHANG S W, DING J, LIAO J, et al. Analysis of natural annual flow time series in the upper reach of the Yellow River based on wavelet transform [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2004(3):32-37. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1009-3087.2004.03.007.
- [8] 曹建荣,于洪军,刘衍君,等.黄河上游水文周期成分和突变特征的小波分析[J].人民黄河,2011,33(3):27-28,144. (CAO J R, YU H J, LIU Y J, et al. Analysis on wavelet of water periodic composition and saltation characteristics of the upper Yellow River [J]. Yellow River, 2011, 33(3):27-28, 144. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2011.03.011.
- [9] 王翠柏,梁小俊,楼章华,等.钱塘江上游径流时序变化的多时间尺度分析[J].人民黄河,2013,35(3):30-32. (WANG C B, LIANG X J, LOU Z H, et al. Multiple time scales analysis of the time series variation of runoff in the upper Qiantang River [J]. Yellow River, 2013, 35(3):30-32. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2013.03.012.
- [10] 叶柏生,李翀,杨大庆,等.我国过去50 a来降水变化趋势及其对水资源的影响(I)年系列[J].冰川冻土,2004,26(5):587-594. (YE B S, LI C, YANG D Q, et al. Variation trend of precipitation and its impact on water resources in China during last 50 years (I): annual variation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(5):587-594. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-0240.2004.05.013.
- [11] KENDALL M G. A new measure of rank correlation [J]. Biometrika, 1938, 30(1/2):81-93. DOI:10.1093/biomet/30.1-2.81.
- [12] KENDALL M G. Rank correlation methods [M]. London: Griffin, 1975.
- [13] DAHMEN E R, HALL M J. Screening of hydrological data; tests for stationarity and relative consistency [M]. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI, 1990.
- [14] 谢平,陈广才,李德,等.水文变异综合诊断方法及其应用研究[J].水电能源科学,2005,23(2):11-14. (XIE P, CHEN G C, LI D, et al. Comprehensive diagnosis method of hydrologic time series change-point analysis [J]. Water Resources and Power, 2005, 23(2):11-14. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-7709.2005.02.004.
- [15] PERREAULT L, BERNIER J, BOBÉE B, et al. Bayesian change-point analysis in hydrometeorological time series. Part I. The normal model revisited [J]. Journal of Hydrology, 2000, 235(3-4):221-241. DOI:10.1016/S0022-1694(00)00270-5
- [16] 熊立华,周芬,肖义,等.水文时间序列变点分析的贝叶斯方法[J].水电能源科学,2003,21(4):39-41. (XIONG L H, ZHOU F, XIAO Y, et al. Bayesian method for detecting change-points of hydrological time series [J]. Water Resources and Power, 2003, 21(4):39-41. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-7709.2003.04.013.
- [17] 燕爱玲,黄强,刘招,等.R/S法的径流时序复杂特性研究[J].应用科学学报,2007,25(2):214-217. (YAN A L, HUANG Q, LIU Z, et al. Complicated property of runoff time series studied with R/S method [J]. Journal of Applied Sciences, 2007, 25(2):214-217. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.0255-8297.2007.02.021.
- [18] 黄强,赵雪花.河川径流时间序列分析预测理论与方法 [M]. 郑州:黄河水利出版社,2008. (HUANG Q, ZHAO X H. Theory and method of analysis and forecast of river runoff time series [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2008. (in Chinese))
- [19] ZHANG Q, XU C, CHEN Y D, et al. Abrupt behaviors of the streamflow of the Pearl River basin and implications for hydrological alterations across the Pearl River Delta, China [J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(3-4):274-283. DOI:10.1016/j.jhydrol.2009.08.026.
- [20] ZUO D, XU Z, YANG H, et al. Spatiotemporal variations and abrupt changes of potential evapotranspiration and its sensitivity to key meteorological variables in the Wei River basin, China [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(8):1149-1160. DOI:10.1002/hyp.8206.
- [21] 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.
- [22] 孙玉燕.淮河中上游地表径流时空演变规律及非平稳性诊断研究 [D]. 芜湖:安徽师范大学,2019. (SUN Y Y. Spatio-temporal evolution and its non-stationary diagnosis of surface runoff in the upper and middle Huaihe River basin [D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2019. (in Chinese))
- [23] YU P S, YANG T C, WU C K, et al. Impact of climate change on water resources in southern Taiwan [J]. Journal of Hydrology, 2002, 260(1/4):161-175. DOI:10.1016/S0022-1694(01)00614-X.



- [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,2002,13(4):515-520.(WANG W S,DING J,XIANG H L. Application and prospect of wavelet analysis in hydrology[J]. Advances in Water Science,2002(4):515-520. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-6791. 2002. 04. 021.
- [25] 周伟,桂林,周林,等. MATLAB小波分析高级技术[M].西安:西安电子科技大学出版社,2006.(ZHOU W,GUI L,ZHOU L,et al. MATLAB wavelet analysis advanced technology[M]. Xi'an: Xidian University Press,2006. (in Chinese))
- [26] 王文圣,丁晶,李跃清.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社,2005.(WANG W S,DING J,LI Y Q. Hydrological wavelet analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2005. (in Chinese))

### Characteristics of the flood peak discharge change of the mainstream of Huaihe River

CHEN Longji<sup>1</sup>, LI Da<sup>2</sup>, HOU Wei<sup>3</sup>, PAN Tingchao<sup>2</sup>

(1. Wenzhou Hydrological Management Center, Wenzhou 325000, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. School of Mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056000, China)

**Abstract:** The Huaihe River is a seventh major river, located in eastern China. The major floods in 1954, 1991, 2003, and 2007 had seriously endangered the lives and property of the people in the Huaihe River basin. The Huaihe River basin in Anhui Province had flooded areas exceeding 1 million  $\text{hm}^2$ . The average annual flood disaster area in 61 years was 217,200  $\text{hm}^2$ , accounting for 5% of the cultivated land area in 2010. To reduce the flood disaster loss, 19 Huaihe River control projects were carried out from 1991 to 2007, and 38 major tasks for the Huaihe River control were completed from 2013 to 2017. The flood control and disaster reduction work in the Huaihe River basin has made renowned achievements and produced tremendous results. Floods in the mainstream of the Huaihe River lasted for a long time with large volume, frequent flood disasters occurred in the basin. Under the influence of climate change and human activities, the flood characteristics of the mainstream of the Huaihe River have changed to varying degrees. The analysis of the characteristics of flood changes in the mainstream of the Huaihe River can provide an important basis for the flood control planning and is of great significance.

Based on the four hydrological stations (Wangjiaba, Lutaizi, Wujiadu, and Xiaoliuxiang), the annual maximum peak discharge sequence was used to study the objectives using the Kendall ranking test, Spearman ranking test, linear trend regression test, and Mann-Kendall test, sequential cluster, rank-sum test, wavelet analysis to analyze the trend, sudden change and periodic change of the flood series of typical stations on the mainstream of the Huaihe River. The final results are as follows:

The annual maximum peak discharge rate of Wangjiaba station is  $-33.08 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ , Kendall ranking test value is  $1.31 < 1.96$ , Spearman ranking test value is  $1.23 < 1.64$ , linear trend regression test value is  $1.49 < 1.64$ ; the annual maximum peak discharge rate of Lutaizi station is  $-5.4 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ , the Kendall ranking test value is  $0.39 < 1.96$ , the Spearman ranking test value is  $0.42 < 1.64$ , and the linear trend regression test value is  $0.25 < 1.64$ ; the annual maximum peak discharge rate of Wujiadu station is  $16.88 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ , the Kendall ranking test value is  $1.84 < 1.96$ , the Spearman ranking test value is  $1.66 > 1.64$ , and the linear trend regression test value is  $1.05 < 1.64$ ; the annual maximum peak discharge rate of the Xiaoliuxiang station is  $22.24 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ , the Kendall ranking test value is  $0.44 < 1.96$ , the Spearman ranking test value is  $0.44 < 1.64$ , the linear trend regression test value is  $0.67 < 1.64$ , respectively. There are multiple intersections between the curves of Mann-Kendall statistical values UF and UB of the annual maximum peak discharge sequence at each station. The sequential cluster method and rank-sum test method are used to judge the mutation points. The Morlet wavelet analysis was used to analyze the periodic variation characteristics of the annual maximum peak discharge of the four hydrological stations Wangjiaba, Lutaizi, Wujiadu and Xiaoliuxiang in the Huaihe River basin, and finally the contour maps of the real part of the Morlet wavelet transform coefficients and the Morlet wavelet variance maps were completed.

The results show that the annual maximum peak discharge in this area had a relatively large change, and the deviation coefficient of the upstream was generally larger than that of the downstream. The upstream sequence had a greater degree of dispersion. Among them, the Wangjiaba and Lutaizi Stations showed an insignificant downward trend, and Wujiadu and Xiaoliuxiang stations showed an insignificant upward trend. The mutation points at the Wangjiaba site were in 1985, 1993 and 2010, the mutation points at the Lutaizi site were in 1957, 2002 and 2014. The mutation points at the Wujiadu site were 1995, and the mutation points at the Xiaoliuxiang site were 1995. Wangjiaba Station mainly has 4 scale cycles of 3-8 a, 8-14 a, 14-22 a and 22-32 a. Lutaizi Station mainly has 2 scale cycles of 5-13 a and 15-32 a; Wujiadu Station mainly has 2 scale cycles of 5-18 a and 20-32 a, while Xiaoliuxiang Station mainly has 4-7 a, 10-15 a and the period of the three scales of 17-25 a.

**Key words:** mainstream of Huaihe River; peak discharge; trend analysis; sudden change feature; periodic change analysis