

# 近 60 年来气候变化和人类活动对长江 中下游水文情势影响定量评价

郭文献 金耀广 李越 史名洋 王鸿翔<sup>1</sup>

(华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450045)

**【摘要】:** 为了定量评价长江中下游近 60 年来水文情势变化, 运用 Mann-Kendall 非参数检验、均值差异 T 检验法对长江中下游宜昌、汉口和大通 3 个水文站 1954~2016 年径流量进行趋势和突变检验, 采用累积量斜率变化率法, 定量评估长江中下游气候变化和人类活动对径流量变化的影响, 并运用 RVA 法对径流量突变前后 32 个水文指标改变度进行定量评价。研究表明: (1) 长江中下游宜昌站和汉口站年径流量呈减少趋势, 大通站年径流量总体呈增加趋势, 总体变化趋势不显著, 径流突变点分别发生在 2002、2005 和 2006 年, 总体上与三峡水库蓄水时间相符; (2) 三峡水库蓄水主要影响长江中下游径流年内变化, 尤其是对年极值影响最大, 且随着距离水库的增加, 影响减弱; (3) 宜昌、汉口和大通水文站水文改变度分别为 55%、46%和 32%, 长江中下游河流水文情势总体上属于中高度改变; (4) 气候变化占对中下游径流量改变贡献程度的 70%左右, 人类用水以及水库蓄水等人类活动贡献程度约占 30%, 气候变化是导致长江中下游年径流量发生改变的主导因素。

**【关键词】:** 径流量 气候变化 人类活动 长江中下游 水文情势

**【中图分类号】:** P333 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)10-2464-07

河流水文情势具有多重属性, 对于维系河流生态系统功能、河流地形地貌特征以及河口三角洲演变都起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。随着气候变化和人类活动的干扰日益增强, 全球大部分河流水文情势均发生了一定程度的改变。尤其是水利工程的修建, 一方面为人类带来防洪、灌溉、发电、航运、工业和城市生活用水等经济效益<sup>[2]</sup>, 另一方面改变了河流天然水文情势, 打破河流原有的连续性, 对流域内生物群落的物种组成和适应能力产生一定的负面影响。随着水利工程开发程度不断加强, 河流原有的水文情势将会受到更为严重的影响, 进而破坏河流生态系统的平衡<sup>[3]</sup>。

长江流域自 20 世纪 60 年代以来水利水电工程大规模展开, 目前以三峡为核心的长江流域水库群已基本建成<sup>[4]</sup>。这些水利工程运行带来巨大经济效益的同时破坏了河流的连续性, 大坝的拦截作用改变下游河流自然流动状态, 这势必会对下游河流水文和生态造成严重的影响<sup>[5,6]</sup>。近几十年来, 长江流域水文情势改变所产生的负面影响也越来越受到重视, 目前国内外众多学者也展开相应的研究。关于水利工程生态水文效应评估方面研究, 国内外学者进行了大量研究。Richter 等从流量、频率、持续时间、时机及变化率 5 个方面总结归纳了具有生态学意义的 33 个水文改变指标 (IHA, Indicators of Hydrologic Alteration) 用来概括河流流动状态的整体特征或某个水文现象<sup>[7]</sup>, 并在此基础上提出变化范围法 (RVA, Range of Variability Approach) 用以定量评价一个或者多个要素在特定活动下的水文情势改变程度<sup>[8,9]</sup>。薛联青等结合内梅罗指数法将 RVA 法进行改进, 将改进后的 RVA

**作者简介:** 郭文献 (1979~), 男, 教授, 主要研究方向为水文水资源及生态水利。E-mail: guowenxian@ncwu.edu.cn; 王鸿翔, E-mail: whxzju@163.com

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51679090, 51609085, 51779094); 2016 年度河南省高校科技创新人才支持计划 (16HASTIT024); 2016 年河南省科技攻关项目 (162102110015); 华北水利水电大学研究生教育创新计划基金项目 (YK2020-05); 贵州省水利厅 2020 年度水利科技项目 (KT202008)

法研究塔里木河水文情势变化<sup>[10]</sup>。郭文献等以金沙江下游屏山站为研究对象,应用 RVA 等多种方法评价长江上游鱼类保护区河流水文情势变化<sup>[11]</sup>。这些研究主要针对长江流域水文年际年内变化特征进行了详细分析,缺乏气候变化和人类活动对于长江水文情势改变的定量评价。

本文通过长江中下游重要控制水文站实测水文及流域降水数据资料,在分析近几十年来长江中下游水文年际变化特征的基础上,定量评价气候变化和人类活动对长江中下游水文情势的贡献率及改变程度,研究可为长江流域河流生态保护奠定基础。

## 1 数据资料和方法

### 1.1 研究水文站及数据

选取长江中下游宜昌、汉口、大通 3 个重要水文站为研究对象,宜昌水文站地处长江上游与中游的交界,位于三峡大坝下游 44km 处,完整地控制了长江上游 100.55 万 km<sup>2</sup> 的来水情况,约一半的河流水量来源于该站以上区域。汉口水文站地处汉江汇入长江以下约 1.4km,是汉江汇入长江后的重要控制水文站,控制流域面积达 148.80 万 km<sup>2</sup>。大通水文站是长江下游最后一个不受潮汐影响的控制站,通常被视为长江干流流量的总控制站,控制流域面积 170.54 万 km<sup>2</sup>,占长江流域面积的 94.7%。根据长江干流水文站分布,选取长江干流宜昌站、汉口站和大通站 1954~2016 年水文及流域内 119 个气象站降水数据研究水文情势变化特征。其中水文数据来源于长江流域水文年鉴,降水资料来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。

### 1.2 趋势分析及突变检验

Mann-Kendall 趋势检验通过计算时间序列数据的标准化变量 Z,与某一置信水平  $\alpha$  (取 0.05) 下的临界变量对比,该法分析得出长江水文变化趋势以及水流发生突变的节点,具体方法见参考文献<sup>[12,13]</sup>。Mann-Kendall 非参数检验在检验过程中可能出现多个突变点,需要对这些突变点进行验证。均值差异 T 检验法<sup>[14]</sup>可以在 M-K 基础上进一步分析可能存在的突变点,在给定的信度范围内在选定的时间点上出现了突变现象,即可以计算某一基准点的统计量 t 与临界值对比进行突变性检验<sup>[15,16]</sup>。本研究采用 Mann-Kendall 法、均值差异 T 检验法共同进行突变检验,结果分析得出长江中下游水文站水文情势发生突变的年份与人类活动之间存在的联系。

### 1.3 RVA 法与累积量斜率变化率法

变动范围法(RVA, Range of Variability Approach)是 Richter 等于 1997 年提出,该法建立在水文变化指标(IHA, Indicators of Hydrologic Alteration)法的基础上,利用建立的生态水文指标评价河流水文情势变化情况<sup>[7,8,9]</sup>。在本文中规定整体水文变化程度 D<sub>v</sub> 值介于 0~25% 属于低度改变; 25%~50% 之间属于中度改变; 50%~75% 属于高度改变, 75%~100% 属于极度改变。

累积量斜率变化率法由王随继等<sup>[17]</sup>提出,该法可用于定量评估人类活动与气候变化对河川径流的贡献程度。假设如果年径流量变化若只受降水影响,则降水和径流量随年份的累积曲线斜率为同倍比变化。将变量所有影响因素的综合定义为 1,根据各种影响因素随时间累积斜率占变量累积斜率变化率的比值推求其对变量的影响程度<sup>[18]</sup>。结合 RVA 法和累积量斜率变化率法,能够定量得出河流水文情势变化情况,得到气候变化和人类活动对于河流水文变化的影响程度。

## 2 结果分析

### 2.1 年径流量变化趋势与突变检验

为揭示长江中下游年均径流量的变化趋势,点绘出长江中下游宜昌、汉口、大通三个水文站点 1954~2016 年的年均径流量

如图 1 所示，并采用 Mann-Kendall 法趋势检验计算长江中下游各水文站年径流量及控制流量面积内降水变化趋势，结果见表 1 所示。宜昌、汉口和大通站的径流量随着距离河口距离增大而减少，这是由于沿江补水所致，同时各水文站之间年际变化波动基本保持一致。其 Mann-Kendall 统计量分别为-1.89, -0.09 和 0.31, 表明大通站年径流量呈增加趋势，宜昌站和汉口站年径流量呈减少趋势，且均低于显著性水平  $\alpha = 0.05$  时的临界值 1.96, 同时流域内降水量变化也基本与径流量相同，无明显的趋势性变化，其 Mann-Kendall 统计量分别为-1.81, -0.79 和-0.21。因此，从年际变化上看，长江干流年径流量随时间无明显变化趋势。

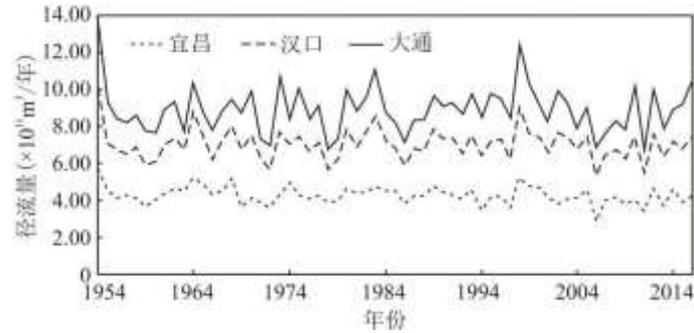


图 1 长江中下游 1954~2016 年均流量变化

表 1 长江中下游年径流量和降水量趋势检验结果

站点	径流量			降水量		
	宜昌	汉口	大通	宜昌	汉口	大通
统计量	-1.89	-0.09	0.31	-1.81	-0.79	-0.21
检验判别	$ Z_c  < 1.96$					
趋势性	无明显减少	无明显减少	无明显增加	无明显减少	无明显减少	无明显减少

运用 Mann-Kendall 检验、均值差异 T 检验对三个站年径流量序列进行突变检验，结果见表 2。分析结果表明，Mann-Kendall 检验中三站均发生四次突变，将这些突变点作为基准年通过均值差异 T 检验进行验证，发现宜昌、汉口和大通站分别在 2002 年、2006 年和 2005 年发生真正意义上的突变现象，这与流域内三峡水库蓄水发电时间基本相符。

表 2 长江中下游径流量突变检验结果

站点	M-K 检验	均值差异 T 检验
宜昌	1958, 1961, 1972, 2002	2002
汉口	1962, 1972, 1979, 2006	2006
大通	1968, 1972, 1980, 2005	2005

## 2.2 长江中下游水文情势改变度评价

考虑到水文情势改变度主要针对径流年内变化，而径流年内变化主要受水利工程影响较为严重，宜昌站作为三峡水库的出流控制水文站，三峡蓄水对下游影响不可忽视，故将宜昌站流量数据划分为 1954~2002 年，2003~2016 年两个阶段，同理汉口站也划分为 1954~2002 年，2003~2016 年两个阶段，通过 RVA 法定量评价长江中下游水文情势变化。

长江中下游各水文站水文指标改变度如图 2 所示。宜昌站在变异期流量发生严重改变有 2 月、3 月份均值，年均最小 1 日、3 日、7 日、30 日、90 日最小值，基流指数，低脉冲历时和逆转次数 10 个指标，可以看出宜昌站在变异期发生严重改变的指标明显多于汉口站和大通站，其主要是宜昌站距离三峡水库最近，水库下泄流量直接影响宜昌站各水文指标。发生高度改变的指标有 1 月、10 月份均值和年最小值出现时间 3 个指标，发生中、低度改变的指标有 19 个，整体改变度为 54.86%，为高度改变。汉口站在变异期发生严重改变的指标有年均最小 1 日、3 日、7 日、30 日最小值，基流指数，低脉冲次数 6 个指标，发生高度改变的仅有低脉冲历时 1 个指标，其余各指标均发生中、低度改变，整体改变度为 45.87%，为中度改变。大通站各水文指标以中低度改变居多，发生高度改变的指标有 12 月均值，年均 1 日、7 日最小值，发生严重改变的指标仅有基流指数一个指标，整体改变度为 31.60%，为中度改变。

根据计算出的宜昌、汉口、大通 3 个水文站蓄水前后 32 个水文指标绝对值的改变度，绘制了各站不同等级变化度所占比例如图 3 所示。可见，宜昌、汉口和大通水文站的流量在改变度等级统计中发生极度改变的水文指标所占比例分别为 34%、19%和 3%，宜昌站受三峡水库影响较大，水文指标改变度最大，而大通站由于长江下游洞庭湖、鄱阳湖等来水调节，水文指标改变度较小；大通站发生低度改变的水文指标所占比例最高，占到 66%，其次是汉口站 56%，宜昌站最低为 44%。

分别计算宜昌、汉口和大通站各组水文指标的整体改变度，其计算结果见表 3。宜昌站第 1 组、第 3 组和第 5 组属于高度改变；汉口站第 2 组和第 4 组指标属于高度改变；大通站仅第 2 组指标改变度为 49.54%，接近高度改变，其余各组指标无高度改变。总体而言，三峡水库蓄水后对第 2 组指标影响最为显著，也说明水库蓄水主要影响着河流下泄流量的极值变化，使坝下河流域均一化。此外，由总体水文改变度计算可得，宜昌站整体水文改变度为高度改变，汉口和大通站为中度改变，表现为距离三峡水库距离的增加，影响程度逐渐减小。

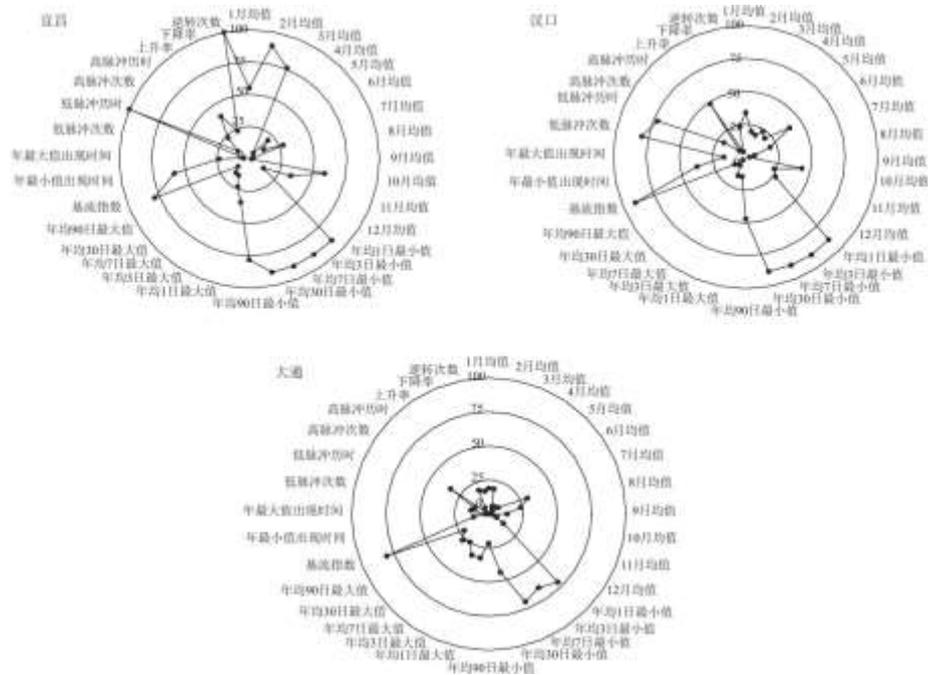


图 2 长江中下游河流水文指标改变度

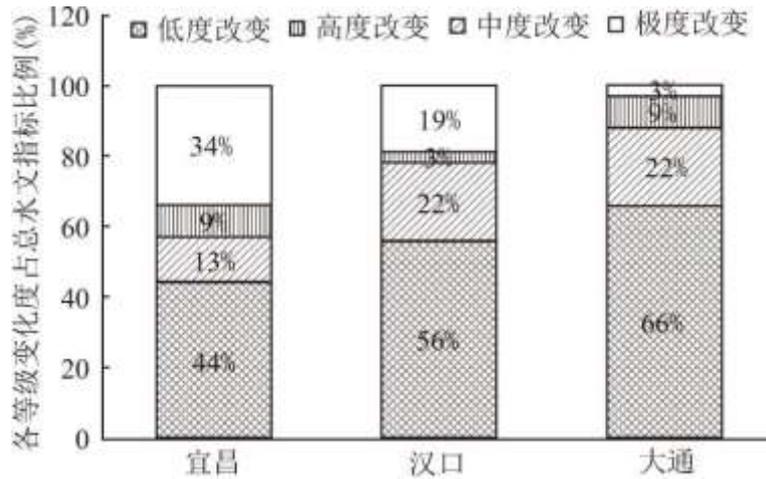


图 3 各水文站不同等级改变度所占比例

### 2.3 气候变化和人类活动对径流量贡献率

影响流域内径流量改变的因素主要包括流域内下垫面条件、自然灾害、气候降雨、人类影响等<sup>[19]</sup>。其中又以降水和人类活动对河流径流影响最为明显。长江多年来年均降水量略有减少但沿江取水稍有增加,整体变幅不大<sup>[20,21]</sup>。同时各水文站 Mann-Kendall 趋势检验的径流趋势性变化各不相同,说明除了降雨量的变化会对年径流量造成一定改变外,人类活动对年径流量改变也造成了一定影响。尤其是三峡水库建成蓄水,使得年径流量在 2002 年附近发生突变现象,即以 2002 年为分界点,将 1954~2002 年定义为基准期,即只受控于气候因素影响,2003~2016 年定义为变异期,此阶段为气候和人类活动共同影响阶段。

表 3 各水文站整体水文改变度

水文站	各组水文改变度 (%)					整体水文改变度 (%)
	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	
宜昌	43.75	65.06	44.77	51.62	63.57	54.86
汉口	25.92	62.26	29.02	54.84	31.23	45.87
大通	15.10	49.54	8.29	18.91	14.91	31.60

通过上述分析,将宜昌、汉口和大通站年径流量划分为两个阶段,通过累积量斜率变化率法计算降水和人类活动对三个水文站的年径流量变化贡献率见表 4。对宜昌站而言,基准期与变异时期相比,降水量对年径流量减少的贡献率为 75.62%,在不考虑其余气候条件变化的前提下,人类活动对年径流量变化的贡献率为 24.37%。汉口站降水量对年径流量减少的贡献率为 66.09%,人类活动对年径流量变化的贡献率为 33.91%。大通站与宜昌站相类似,大通站降水量对年径流量增加的贡献率为 72.86%,人类活动对年径流量变化的贡献率分别为 27.14%。综上所述,人类活动对于长江中下游径流量改变贡献率约为 30%,气候变化对长江中下游整体径流量改变影响贡献率约为 70%,可见气候变化是导致年径流量变化的主导因素。

表 4 不同时段各水文站降水和人类活动对径流量贡献率

水文站	时期	径流量 $Y_R$	降水量 $Y_P$	降水 $C_P$	人类活动 $C_H$
宜昌站	基准期	4.44	1030.5	—	—
	变异期	4.25	997.15	75.62%	24.37%
汉口站	基准期	7.05	1040.1	—	—
	变异期	6.65	1001.1	66.09%	33.91%
大通站	基准期	8.75	1094.2	—	—
	变异期	8.84	1086	72.86%	27.14%

#### 2.4 气候变化和人类活动对径流量影响

综合上述研究结果并结合图 4 可以看出, 长江中下游各水文站径流量在年际变化上同时受气候变化和人类活动影响, 但气候变化对径流改变产生了更大的影响。长江干流各水文站中, 宜昌和汉口站年径流量呈减少趋势, 其 Mann-Kendall 统计量分别为-1.89 和-0.09。其年径流量减少主要与上游降水及人类取水有关, 流域内径流补给主要为冰雪融水和大气降水两种, 其中以大气降水为主<sup>[22]</sup>。宜昌和汉口站控制流域内降水呈减少趋势, 其 Mann-Kendall 统计量为-1.81 和-0.79, 其年径流量下降主要受流域内降水的影响, 另一方面随着城市化进程加快以及各类用途用水, 沿江取水逐渐增加, 对年径流量减少也造成了一定的影响, 因此径流量在受降水和人类活动的影响下年际变化上呈减少趋势。大通站流域内降水量 Mann-Kendall 统计量为-0.21, 且大通站年径流量呈不明显增加趋势, 分析其原因主要是降水量减少趋势较小, 对年径流量变化的影响较小, 而人类取水虽逐年上升, 但用水过程中耗水量并未增加, 同时流域内大型水库逐渐建成, 但水库蓄水主要调节流量年内变化, 对年径流量变化并无影响。跨流域调水工程(如南水北调工程)在一定程度上减少年径流量, 但调水量不足 1%, 对大通站年径流量几乎可忽略不计<sup>[23]</sup>, 长江流域水系发达, 支流汇入以及湖泊调蓄作用都会对径流量有一定的补充作用, 因此大通站年径流量无明显变化。

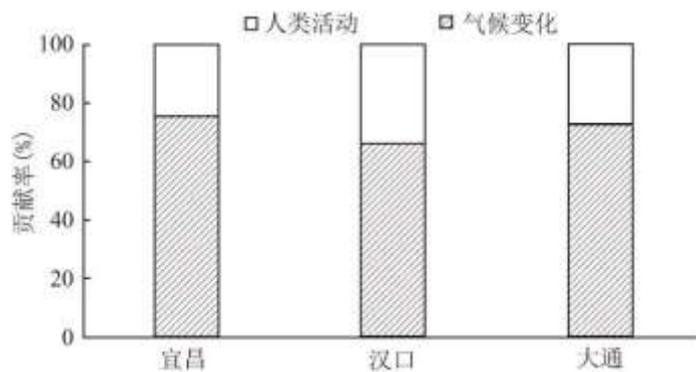


图 4 气候变化和人类活动对长江中下游径流量变化影响

### 3 结论

(1) 通过 Mann-Kendall 法和均值差异 T 检验法共同进行趋势性和突变检验, 结果分析得出长江中下游水文站水文情势发生突变的年份与人类活动之间存在的联系。长江中下游年径流量无明显趋势性变化, 宜昌、汉口和大通站年径流量突变点分别出现在 2002 年, 2006 和 2005 年, 这与三峡水库蓄水时间相符。

---

(2)采用 RVA 法对长江中下游水文站 32 个水文指标综合分析,宜昌水文站整体水文改变为 55%,属于高度改变,汉口和大通水文站整体水文改变度为 46%和 32%,属于中度改变。总体而言,长江中下游整体水文改变度为中高度改变,三峡水库蓄水主要影响下游径流年内变化,对年极值影响最为显著,且表现为随着距离水库的距离增加,影响程度逐渐减小。随着三峡水库的正常蓄水、南水北调工程调水以及长江上游一批大型水利工程的建成,长江中下游河流水文情势将进一步发生改变,也将进一步对河流生态系统健康产生影响。

(3)采用累积量斜率变化率法,定量分析了气候变化与人类活动对长江中下游径流量影响程度贡献率。长江中下游年径流量变化受流域人类用水和水库蓄水等人类活动影响较小,其贡献程度约占 30%左右,而气候变化主要受流域内降水量的影响,对河流径流量影响占主导,其贡献程度约为 70%。

#### 参考文献:

- [1]彭涛,田慧,秦振雄,等.气候变化和人类活动对长江径流泥沙的影响研究[J].泥沙研究,2018,43(6):54-60.
- [2]姜刘志.三峡蓄水后长江中下游水文情势变化特征及其对鱼类的影响研究[D].中国科学院大学,2014.
- [3]薛联青,张卉,张洛晨,等.基于改进 RVA 法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(3):189-196.
- [4]段唯鑫,郭生练,王俊.长江上游大型水库群对宜昌站水文情势影响分析[J].长江流域资源与环境,2016,25(1):120-130.
- [5]王学雷,姜刘志.三峡工程蓄水前后长江中下游环境流特征变化研究[J].华中师范大学学报(自科版),2015,49(5):797-804.
- [6]ZHANG X,DONG Z C,GUPTA HOSHIN,et al.Impact of the three gorges dam on the hydrology and ecology of the Yangtze River[J].Water,2016,8(12):590.
- [7]RICHTER B D,BAUMGARTNER J V,POWELL J,et al.A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J].Conservation Biology,1996,10(4):1163-1174.
- [8]RICHTER B D.How much water does a river need?[J].Freshwater Biology,1997,37:231-249.
- [9]RICHTER B D,BAUMGARTNER J V,BRAUN D P,et al.A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network[J].Regulated River:Research and Management,1998,14(4):329-340.
- [10]薛联青,张卉,张洛晨,等.基于改进 RVA 法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(3):189-196.
- [11]郭文献,陈鼎新,李越,等.基于 IHA-RVA 法金沙江下游生态水文情势评价[J].水利水电技术,2018,49(8):155-162.
- [12]KAHYA E,KALAYC S.Trend analysis of streamflow in Turkey[J].Journal of Hydrology,2004,289:128-144.
- [13]BURN D H,ELNUR,MAH.Detection of hydrologic trends and variability[J].Journal of Hydrology,2002,255:107-

---

122.

[14]魏凤英, 曹鸿兴. 中国、北半球和全球的气温突变分析及其趋势预测研究[J]. 大气科学, 1995, 19(2):140-148.

[15]邓伟, 栾兆擎, 罗先香, 等. 三江平原沼泽性河流径流演变的驱动力分析[J]. 地理学报, 2002, 57(5):603-610.

[16]丁文峰, 张平仓, 任洪玉. 近 50 年来嘉陵江流域径流泥沙演变规律及驱动因素定量分析[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(3):23-27.

[17]王随继, 李玲, 颜明. 气候和人类活动对黄河中游区间产流量变化的贡献率[J]. 地理研究, 2013, 32(3):395-402.

[18]王彦君, 王随继, 苏腾. 降水和人类活动对松花江径流量变化的贡献率[J]. 自然资源学报, 2015, 30(2):304-314.

[19]王延贵, 史红玲, 刘茜. 水库拦沙对长江水沙态势变化的影响[J]. 水科学进展, 2014, 25(4):467-476.

[20]曾小凡, 翟建青, 姜彤, 等. 长江流域年降水量的空间特征和演变规律分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(6):727-732.

[21]陈进, 刘志明. 近 20 年长江水资源利用现状分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(1):1-4.

[22]冯亚文, 任国玉, 刘志雨, 等. 长江上游降水变化及其对径流的影响[J]. 资源科学, 2013, 35(6):1268-1276.

[23]陈衍, 王保栋, 辛明. 气候变化及人类活动对长江入海径流的影响分析[J]. 人民长江, 2018, 49(16):36-40.