

1980 – 2018 年曹娥江中上游径流变化特征及归因分析

刘洋^{1,2}, 韩晓旭³, 李丽娟¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国城市建设研究院有限公司, 北京 100120)

摘要: 水资源对人类社会的发展至关重要, 掌握河川径流变化规律是实现水资源可持续利用的基础。当前关于径流变化的研究涉及径流年际变化规律、径流年内分配特征、径流变化的归因分析 3 个方面。利用 1980 – 2018 年嵊州站、黄泽站和花山站 3 个水文站的月径流数据, 结合多种研究方法对曹娥江中上游的径流量变化进行了研究。结果表明: 曹娥江中上游年平均径流量呈减小趋势, 其中黄泽站变动最大, 其次为花山站, 嵊州站年平均径流量变动最小; 春季各站平均径流量均呈显著减小趋势, 冬季黄泽站平均径流量呈显著增大趋势; 嵊州站和花山站年平均径流量在 2003 年发生突变, 黄泽站没有明显突变点; 不同时期径流年内分配过程线均呈“三峰”形态, 峰值分别出现在 3 – 4 月、6 月和 8 – 9 月, 峰值表现为“低 – 高 – 低”的特征; 对于嵊州站和花山站, 人类活动为研究期径流量减少的主要原因, 而降雨因素是造成黄泽站径流量减少的主要原因。

关键词: 年径流变化; 径流年内分配; 归因分析; 曹娥江

中图分类号: TV121

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)06-0053-09

Characteristics and attribution analysis of runoff changes in the middle and upper reaches of Cao'e River from 1980 to 2018

LIU Yang^{1,2}, HAN Xiaoxu³, LI Lijuan¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. China Urban Construction Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: Water resources are of vital importance to the development of human society. Mastering the rule of river runoff changes is the basis for achieving sustainable use of water resources. The current research on runoff changes involves three aspects, namely, the interannual change of runoff, the annual distribution characteristics of runoff, and the attribution analysis of runoff changes. Based on the monthly runoff data of Shengzhou Station (SZ), Huangze Station (HZ) and Huashan Station (HS) from 1980 to 2018, the runoff changes in the middle and upper reaches of the Cao'e River are investigated using a variety of research methods. The results show that the annual average runoff showed a downward trend, which changed the greatest at HZ, followed by HS and SZ. The average runoff of all three stations also changed seasonally, which showed a significant downward trend in spring, but that of HZ showed a significant upward trend in winter. Both SZ and HS experienced an abrupt change in annual average runoff in 2003, whereas HZ had no obvious abrupt change. The distribution process curve of runoff in different periods showed a pattern of “three peaks” with the characteristics of “low – high – low”, which happened in March to April, June and August to September, respectively. For SZ and HS, human activities were the main reason for the reduction of runoff during the change period, whereas the reduction of rainfall was responsible for that for HS.

Key words: annual runoff change; annual distribution of runoff; attribution analysis; the Cao'e River

收稿日期: 2021-10-18; 修回日期: 2022-06-19

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23020101)

作者简介: 刘洋(1993-), 女, 山东青岛人, 博士研究生, 研究方向为水文与水资源。

通讯作者: 李丽娟(1961-), 女, 吉林吉林人, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为水文与水资源。

1 研究背景

水资源是基础性的自然资源和战略性的经济资源,是实现经济社会可持续发展和维系生态平衡及环境优良的重要基础^[1]。IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第五次报告指出,随着 21 世纪全球气候持续变暖,遭受水资源短缺和河流洪水影响的人口比例将增加^[2]。全球气候变暖造成的冰川融化、海平面上升、极端降水增加等,直接影响着区域水循环过程和水资源分布。同时,人类社会对水资源的需求与日俱增,导致水资源的供需矛盾持续加剧。大型水利工程的修建、水土保持措施的实施及土地利用变化等人类活动通过改变区域的产汇流条件对区域水文过程产生影响,不同气候变化情景和多种人类活动综合作用使得流域的产汇流机制更为复杂^[3]。河川径流作为水资源的重要组成部分和转化形式,是地表水循环的重要环节,更是社会发展资源需求的直接来源。径流变化规律及其归因识别已成为现代水科学领域的热点问题之一^[4],是实现流域水资源综合管理和可持续发展的重要基础工作。

随着流域管理者和科研工作者对径流变化的持续关注,相关研究全面展开。当前主要研究内容包括径流年际变化规律、径流年内分配特征和径流变化的归因分析 3 个方面,研究时间尺度涉及月径流变化^[5]、水文时期和季节径流变化^[6-7]、年径流变化、年代际径流变化^[6]、基准期和对比期径流变化^[7]。

目前,关于径流变化的研究方法日益丰富,在径流年际变化规律的研究方面,已从年径流的趋势性、持续性、变异性、周期性及丰枯性等多角度展开。(1)趋势性:常采用线性倾向率法、滑动平均法、累积距平法、Mann-Kendall(M-K)趋势检验法、Spearman 秩相关系数法研究趋势走向;(2)持续性:常采用 R/S 分析法判断未来发展;(3)突变性:常采用 M-K 突变检验法、Pettitt 检验法、滑动 t 检验法、Cramer 检验法、Yamamoto 检验法、有序聚类法和启发式分割算法寻找突变点;(4)周期性:常采用小波分析方法识别周期;(5)丰枯性:常采用距平百分率、 Z 指数法、均值标准差法、集对分析法和 Markov 过程法描述丰枯变化。径流年内分配特征主要表现在不均匀性、集中程度和变化幅度 3 个方面。(1)不均匀性:利用不均匀系数和完全调节系数表征;(2)集中程度:常采用集中期和集中度进行研究;(3)变化幅度:常采用极值比表示。径流变化的归因分析旨在定量分析气候变化和人类活动对径流变

化的贡献率,是最为重要的研究内容。经过大量实践研究,Pearson 相关分析法、灰色关联法、双累积曲线法、弹性系数法、累积斜率变化率比较法和水文模型法均取得了较好的研究效果。上述研究方法各具优势,同时也存在局限,在实际工作中常将多种方法结合使用,以提升结论的可信度。

近年来,学者们不断探索径流评价新方法。王青等^[8]将衡量经济收入平衡的指标基尼系数和洛伦兹不对称系数作为评价径流年内分配均匀性的指标;王小杰等^[9]利用分维数描述了径流序列的复杂性;范琳琳等^[10]通过验证表明,HHT(Hilbert-Huang transform)方法基本综合了小波变换和 M-K 检验对时间序列周期与趋势分析的功能;谢平等^[11]通过构建水文变异诊断系统,实现了各种检验方法的联合,可对水文序列的趋势变异和跳跃变异进行综合诊断。

曹娥江是钱塘江的最大支流,位于浙江省东北部,发源于金华市磐安县,河流流向自南向北,依次流经绍兴市的新昌县、嵊州市、上虞区和柯桥区。曹娥江干流全长 193 km,流域面积为 6 080 km²。上游澄潭江为曹娥江主流,主要支流有长乐江、新昌江和黄泽江,呈典型的扇形水系。曹娥江为常年性河流,上游属山溪性河流,下游属感潮河段。流域位于亚热带季风气候区,四季分明,温和多雨,4 月中旬进入汛期,6 月中旬至 7 月上旬为梅雨季,雨量相对集中,8 至 9 月份进入台风期,雨量较大,易形成洪涝灾害。曹娥江拥有厚重的人文历史,是沿途城市重要的工农业水源,具有防洪排涝、水资源保障和交通运输等重要功能。掌握曹娥江的径流变化特征,是推进区域水资源合理配置、防洪排涝部署及流域综合治理的基础。目前,关于曹娥江长时间序列径流特征的研究较少。因此本文基于曹娥江中上游的嵊州站、黄泽站、花山站 3 个水文站的月平均径流资料,结合多种研究方法,对曹娥江中上游进行径流变化特征研究及归因分析。研究区地理位置及水文站点分布如图 1 所示。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究涉及的径流数据来自《中华人民共和国水文年鉴》,3 个水文站的基本信息见表 1。其中,嵊州站和黄泽站实测径流数据时段为 1980-2018 年,由于站别更改,花山站实测径流数据时段为 1983-2012 年。为统一研究时段,对花山站径流数据进行插补延长。鉴于花山站与其上游嵊州站月径

流数据相关性较好,故优先采用上下游径流相关方法^[12-13]进行插补,将其数据时段延长至 1980 – 2018 年。插补后各站资料系列长度相同,资料精度可靠。降雨数据采用 1980 – 2018 年嵊州气象站数据,数据来自中国气象数据网《中国地面气候资料月值数据集》。

表 1 曹娥江中上游水文站基本信息

站名	所在河流名	位置	集水面积/km ²	实测数据时段
嵊州站	曹娥江	120°50′N,29°36′E	2280	1980 – 2018
黄泽站	黄泽江	120°55′N,29°35′E	542	1980 – 2018
花山站	曹娥江	120°50′N,29°42′E	3043	1983 – 2012

2.2 研究方法

本研究从径流年际变化的趋势性、突变性及丰枯性和径流年内分配的不均匀性、集中程度及变化幅度等方面研究曹娥江中上游径流变化特征。各研究内容的相应研究方法如下。

- (1) 年际变化趋势性研究:线性倾向率法、M – K趋势检验法^[14]。
- (2) 年际变化突变性研究:M – K 突变检验法^[15]、滑动 *t* 检验法^[16];
- (3) 年际变化丰枯性研究:距平百分率^[17];
- (4) 年内分配特征研究:不均匀系数、集中期和集中度^[18]、极值比;
- (5) 径流变化归因分析:双累积曲线法^[19]。

各研究方法的原理参考标注文献,在此不再赘述。在研究区季节和水文期划分上,3 – 5 月为春季、6 – 8 月为夏季、9 – 11 月为秋季、12 月 – 次年 2 月为冬季;1 – 3 月为非汛期(汛前)、4 – 9 月为汛期、10 – 12 月为非汛期(汛后)。

3 结果分析与讨论

3.1 径流量年际变化

3.1.1 趋势性分析 1980 – 2018 年曹娥江中上游径流量年际变化趋势如图 2 所示。

由图 2 可以看出,1980 – 2018 年,嵊州站年平均径流量在 25.3 ~ 82.4 m³/s 之间波动,最大值出现在 2015 年,最小值出现在 2004 年,总体呈现减小趋势,平均气象倾向率为 -1.39 (m³/s)/10a;黄泽站年平均径流量在 4.8 ~ 18.6 m³/s 之间波动,最大值出现在 1990 年,最小值出现在 2003 年,总体呈现减小趋势,平均气象倾向率为 -0.11 (m³/s)/10a;花山站年平均径流量在 32.4 ~ 109.9 m³/s 之间波动,最大值出现在 2015 年,最小值出现在 2004 年,总体呈现减小趋势,平均气象倾向率为 -1.98 (m³/s)/10a,减小幅度在 3 个水文站中最大。3 个水文站径流序列表明 1980 – 2018 年曹娥江中上游年径流量呈减小趋势。

从多年径流量特征值来看,1980 – 2018 年,嵊州站多年平均径流量为 53.6 m³/s,黄泽站多年平均径流量为 11.6 m³/s,花山站多年平均径流量为 71.6 m³/s,嵊州站、黄泽站和花山站年平均径流量变差系数分别为 0.257、0.300 和 0.260,年平均径流量极值比分别为 3.25、3.87 和 3.39,表明研究期内黄泽站年平均径流量变动最大,其次为花山站,嵊州站年平均径流量变动最小。

不同研究时期径流年际变化 M – K 趋势性诊断结果见图 3。以检验统计量 *Z* 的取值作为趋势性诊断依据,若 *Z* > 0,则可诊断径流序列呈上升趋势;相反若 *Z* < 0,则可诊断径流序列呈下降趋势。图 3 表明,与线性倾向率法结果一致,3 个水文站年平均径流量均呈减小趋势,但未通过 0.05 显著性水平检验。从不同季节的平均径流量变化情况来看,春季 3 个水文站均呈显著减小趋势;夏季 3 个水文站的

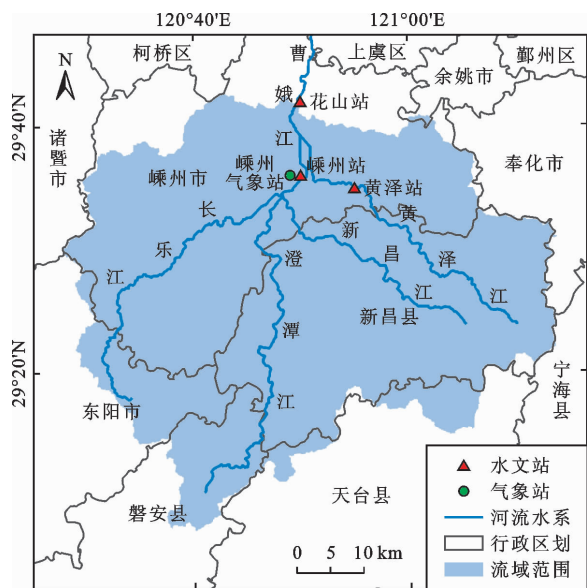


图 1 曹娥江中上游流域地理位置及水文站点分布

平均径流量变化趋势有所不同,嵊州站呈不显著增大趋势,黄泽站呈不显著减小趋势,而花山站未表现出明显的变化趋势;秋季 3 个水文站均呈不显著增大趋势;冬季嵊州站和花山站的平均径流量呈不

显著增大趋势,黄泽站呈显著增大趋势。从不同水文时期平均径流量变化情况看,汛前和汛期 3 个水文站均呈不显著减小趋势,汛后 3 个水文站均呈不显著增大趋势。

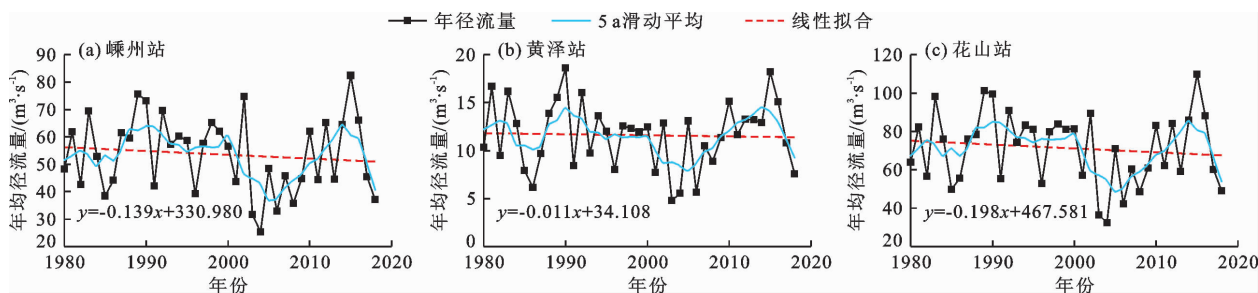


图2 1980—2018年曹娥江中上游水文站年径流量变化趋势

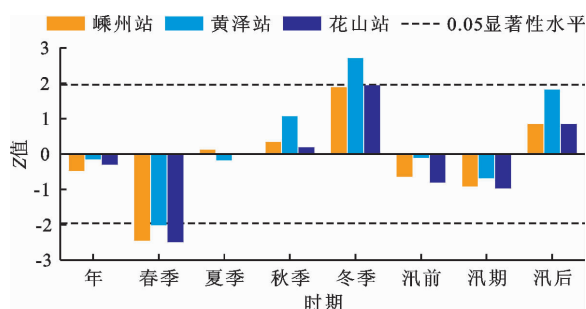


图3 曹娥江中上游不同时期径流年际变化 M-K 趋势性诊断结果

3.1.2 突变性分析 为提高结论的可信度,采用 M-K 突变检验法和滑动 t 检验法相结合的方式分析 1980—2018 年曹娥江中上游水文站年径流量的突变性。

对径流序列进行 M-K 突变检验时,给定显著性水平 $\alpha = 0.05$,绘制 UF 和 UB 统计量序列曲线及显著性检验临界线 U_α ,根据曲线显示,若 $UF(UB) > 0$,则可判断径流序列呈现增大趋势,相反若 $UF(UB) < 0$,则可判断径流序列呈现减小趋势。 UF 超过 U_α 临界线的部分即为出现突变的时间区域,需重点关注^[20]。如果 UF 和 UB 两条曲线在临界线之间产生交点,那么交点对应的时刻便是突变开始的时间。

曹娥江中上游水文站年径流量 M-K 突变检验结果见图 4。

由图 4 可见,嵊州站年平均径流量可能发生突变的年份为 2003 和 2015 年;黄泽站年平均径流量可能存在的突变年份为 2001、2003 和 2015 年;花山站年平均径流量可能在 2003 年或 2015 年发生突变。

对径流序列进行滑动 t 检验,给定显著性水平 $\alpha = 0.05$,选取不同子序列长度 n 值分别计算统计量 t ,并与临界值 t_α 进行比较。若统计量 t 超出临界值范围,则可判断在基准点时刻出现了突变,否则没有突变发生。分别取 $n = 4, 5, 6, 7, 8$ 对径流序列进行反复检验比较,检验结果见表 2,图 5 给出了 $n = 5$ 时的检验结果。

由表 2 和图 5 可知,嵊州站年平均径流序列可能的突变年份为 2003、2010 和 2012 年,其中 2003 年还通过了置信水平 0.01 的显著性检验,黄泽站可能的突变年份为 2009 和 2010 年,花山站可能的突变年份为 2003 和 2010 年。综合不同子序列长度检验结果,嵊州站年平均径流量较大可能在 2003 和 2010 年发生突变,黄泽站年平均径流量较大可能在 2009 和 2010 年发生突变,花山站年平均径流量较大可能在 2003 和 2010 年发生突变。

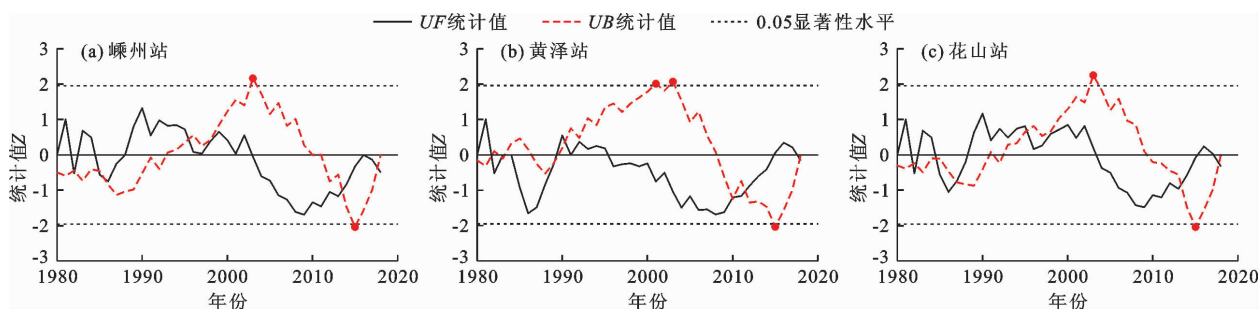


图4 1980—2018年曹娥江中上游水文站年径流量 M-K 突变检验结果

表 2 滑动 t 检验 n 不同取值下各水文站年均径流序列可能的突变年份(0.05 显著性水平)

n 值	可能的突变年份		
	嵊州站	黄泽站	花山站
4	2003	2001,2010	2003
5	2003 *,2010,2012	2009,2010	2003,2010
6	2003 *,2004,2011,2012	2003,2009 *,2010 *	2003,2009,2010,2012
7	2003 *,2010 *,2011	2008,2009 *,2010 *	2001,2003 *,2009,2010 *,2011
8	2000,2001,2003,2009,2010,2011	2001,2008,2009 *,2010 *	2001,2002,2003,2009,2010,2011

注:“*”表示还通过了置信水平 0.01 的显著性检验。

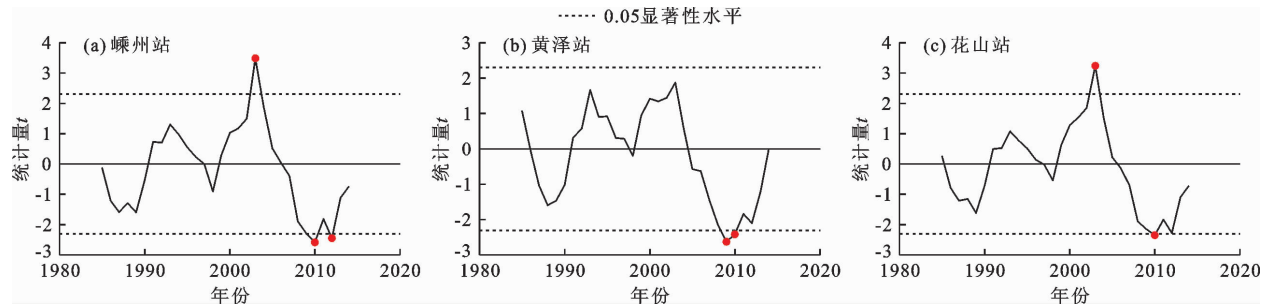


图 5 1980 – 2018 年曹娥江中上游水文站滑动 t 检验结果($n = 5$)

综合 M – K 检验和滑动 t 检验的结果,可以认为嵊州站和花山站年平均径流量均在 2003 年发生突变,而黄泽站年平均径流量未发生明显的突变。

3.1.3 丰枯性变化 利用距平百分率 K 表征径流的丰枯状态,按 K 值的大小将径流丰枯状态划分为枯水($K < -20\%$)、偏枯($-20\% \leq K < -10\%$)、平水($-10\% \leq K \leq 10\%$)、偏丰($10\% < K \leq 20\%$)、丰水($K > 20\%$)5 个级别。1980 – 2018 年嵊州站、黄泽站和花山站径流丰枯状态统计结果见表 3。表 3 中的统计结果表明,嵊州站不同丰枯级别的年数占比排序为丰水年 > 枯水年 > 偏枯年 = 平水年 > 偏丰年;黄泽站排序为枯水年 > 平水年 > 偏丰年 = 丰水年 > 偏枯年;花山站排序为枯水年 > 偏丰年 > 丰水年 > 偏枯年 > 平水年。3 个水文站中,黄泽站平水年比例最大,水情最为稳定;嵊州站丰水年比例最大,发生洪涝灾害的风险最高;花山站枯水年比例最大,水情最为不稳。

3.2 径流量年内分配

将研究期划分为 1980 年代、1990 年代、2000 年

代、2010 – 2018 年及全时期 1980 – 2018 年 5 个时段,绘制各时段嵊州站、黄泽站及花山站的径流量年内月平均分配过程线,如图 6 所示。由图 6 可以看出,3 个站点不同时段年内分配曲线均呈“三峰”形态,第 1 个峰值出现在 3 – 4 月,第 2 个峰值出现在 6 月,第 3 个峰值出现在 8 – 9 月,3 个峰值表现为“低 – 高 – 低”的特征。多年月平均径流量 3 个峰值的比例分别为:3 月占比 10.2%,6 月占比 16.7%,8 月占比 11.4%;多年平均径流量季节分配比例为:春季占比 27.6%,夏季占比 38.8%,秋季占比 19.8%,冬季占比 13.8%;多年平均径流量水文期分配比例为:汛前占比 20.3%,汛期占比 66.5%,汛后占比 13.2%。

上述不同时段曹娥江中上游水文站径流量年内分配特征值计算结果见表 4。其中,不均匀系数和完全调节系数用以表征径流量年内分配均匀程度,其数值越大,表明年内分配越不均匀;极值比用以表征径流量的相对变化幅度;集中度反映径流量集中程度,集中期反映最大径流量出现的时间。

表 3 1980 – 2018 年曹娥江中上游水文站径流丰枯状态统计结果

水文站	枯水年		偏枯年		平水年		偏丰年		丰水年	
	年数/a	比例/%	年数/a	比例/%	年数/a	比例/%	年数/a	比例/%	年数/a	比例/%
嵊州站	9	23.1	7	17.9	7	17.9	6	15.4	10	25.7
黄泽站	10	25.6	4	10.3	9	23.1	8	20.5	8	20.5
花山站	11	28.2	6	15.4	5	12.8	10	25.7	7	17.9

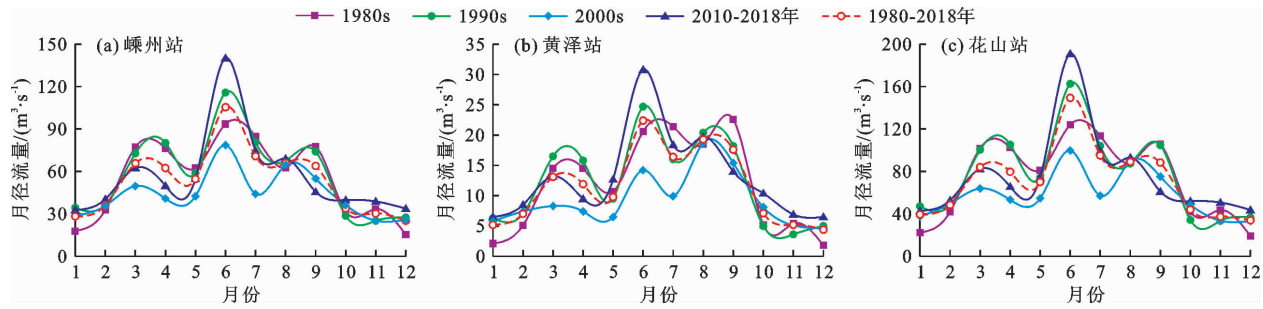


图 6 1980 - 2018 年不同时段曹娥江中上游水文站径流量年内月平均分配过程线

表 4 1980 - 2018 年不同时段曹娥江中上游水文站径流年内分配特征值

水文站	时段	不均匀系数	完全调节系数	极值比	集中度	集中期/(月-日)
嵊州站	1980s	0.48	0.22	6.09	0.30	06-17
	1990s	0.46	0.20	4.61	0.28	06-13
	2000s	0.35	0.14	3.12	0.19	06-30
	2010 - 2018 年	0.50	0.17	4.29	0.26	06-19
	1980 - 2018 年	0.42	0.18	4.19	0.26	06-18
黄泽站	1980s	0.63	0.29	12.70	0.38	07-05
	1990s	0.55	0.25	6.85	0.31	06-23
	2000s	0.46	0.19	4.03	0.24	07-30
	2010 - 2018 年	0.52	0.20	4.76	0.30	07-03
	1980 - 2018 年	0.51	0.22	5.07	0.31	07-05
花山站	1980s	0.49	0.23	6.55	0.31	06-19
	1990s	0.49	0.21	4.86	0.28	06-12
	2000s	0.35	0.14	3.00	0.19	07-04
	2010 - 2018 年	0.52	0.18	4.45	0.27	06-20
	1980 - 2018 年	0.45	0.18	4.41	0.27	06-20

综合分析径流年内分配过程线(图 6)和年内分配特征值(表 4),嵊州站 1980 年代、1990 年代及 2010 - 2018 年径流年内不均匀系数均高于 1980 - 2018 年全时期,表明该站 3 个时期的径流量年内分配较为不均匀,其中 2010 - 2018 年最为不均匀,所有时期中 2000 年代径流年内分配最为均匀,各时期均匀程度变化不大。从变化幅度来看,1980 年代径流量年内相对变化幅度最大,2000 年代相对变化幅度最小;从集中程度来看,1980 年代径流量年内分配最为集中,2000 年代集中程度最低;各时期的径流量集中期皆分布在 6 月中下旬,2000 年代集中期最晚。2000 年代径流量年内分配特征值与其他时期相比表现出明显差异。黄泽站 1980 年代径流量年内分配最为不均匀、相对变化幅度最大且集中程度最高,2000 年代径流量年内分配最为均匀、相对变化幅度最小且集中程度最低,集中期也最晚。花

山站径流量年内分配特征与嵊州站一致。

对不同水文站之间的径流量年内分配特征进行比较,从径流量年内分配的均匀程度上看,不同时期均表现为嵊州站 > 花山站 > 黄泽站;从年内径流量的相对变化幅度上看,除 2000 年代嵊州站小于花山站外,其他各时期径流量年内相对变化幅度为黄泽站 > 花山站 > 嵊州站;从径流集中程度来看,黄泽站年内径流集中程度最高,嵊州站集中程度与花山站接近;不同时期径流量集中期黄泽站最晚,花山站集中期与嵊州站接近,略晚于嵊州站。

3.3 径流量变化归因分析

径流序列变化量是气候变化和人类活动综合作用的结果。两个因素中,气候变化会引起“天然径流量”的变化,而“实测径流量”与“天然径流量”之间的差异则由人类活动主导。径流变化归因方法的两个关键步骤为径流突变点的诊断和天然径流量的

还原^[3],其中,提高天然径流量模拟精度是近年来水文领域研究的重要方向。本文采用双累积曲线法量化气候变化和人类活动对曹娥江中上游径流变化的贡献。根据归因分析原理,人类活动会改变区域的降雨 – 径流关系,在降雨 – 径流双累积曲线上表现为斜率的变化,对突变前后阶段进行降雨 – 径流回归分析,可快捷实现量化归因。

根据前文 3.1.2 节突变性分析结果,嵊州站和花山站年径流量在 2003 年发生突变,黄泽站年径流不存在明显的突变点,因此可将 2003 年作为曹娥江中上游径流量发生突变的时间,将突变点前后时段分别划分为基准期(1980 – 2002 年)和变化期(2003 – 2018 年)。

1980 – 2018 年嵊州气象站年降雨量变化如图 7 所示。曹娥江中上游年降雨量在 2003 年发生明显的突变,与径流量突变时间相一致。2003 年绍兴市遭遇 50 年一遇的严重干旱,降雨量大幅减少,仅为

879 mm。区域 1980 – 2002 年基准期年平均降雨量为 1 386 mm,2003 – 2018 年变化期年平均降雨量减少至 1 305 mm。

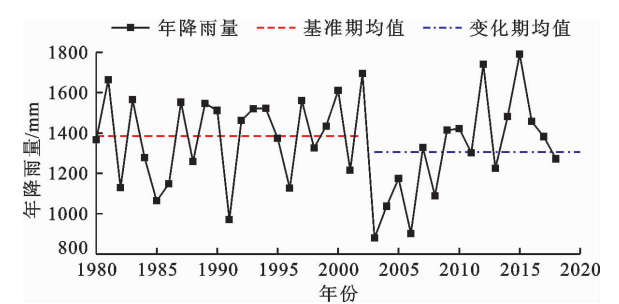


图 7 1980 – 2018 年嵊州气象站年降雨量变化

利用 1980 – 2018 年各水文站实测径流量和降雨量资料构建的双累积曲线如图 8 所示,并分别对基准期(1980 – 2002 年)和变化期(2003 – 2018 年)进行回归分析。降雨量变化与人类活动对研究区径流量变化的贡献率见表 5。

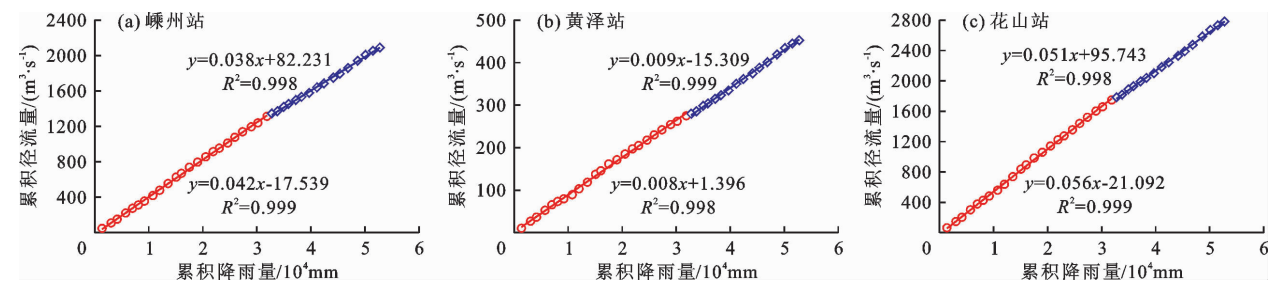


图 8 1980 – 2018 年曹娥江中上游基准期和变化期径流量 – 降雨量双累积曲线

表 5 降雨量变化与人类活动对曹娥江中上游径流量变化的贡献率

水文站	时段	实测值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	模拟值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	径流变化/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	降雨量影响		人类活动影响	
					变化量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	贡献率/ %	变化量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	贡献率/ %
嵊州站	1980 – 2002 年	57.1	57.5					
	2003 – 2018 年	48.5	54.8	– 8.6	– 2.3	26.8	– 6.3	73.2
黄泽站	1980 – 2002 年	12.0	11.2					
	2003 – 2018 年	11.1	10.4	– 0.9	– 1.5	177.2	0.7	– 77.2
花山站	1980 – 2002 年	76.0	76.7					
	2003 – 2018 年	64.6	73.1	– 11.4	– 2.9	25.4	– 8.5	74.6

结合表 5 对研究区各水文站径流量变化归因分析如下:

(1)嵊州站变化期与基准期相比,径流量减少了 $8.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。其中,由于降雨减少造成的径流量变化为 $-2.3 \text{ m}^3/\text{s}$,降雨因素的贡献率为 26.8%,由人类活动造成的径流量变化为 $-6.3 \text{ m}^3/\text{s}$,人类活动

的贡献率高达 73.2%,远高于降雨因素的贡献,人类活动是嵊州站径流量减少的主要因素。

(2)花山站变化期与基准期相比,径流量减少了 $11.4 \text{ m}^3/\text{s}$,其中,由于降雨减少造成的径流量变化为 $-2.9 \text{ m}^3/\text{s}$,降雨因素的贡献率为 25.4%,由人类活动造成的径流量变化为 $-8.5 \text{ m}^3/\text{s}$,人类活动

的贡献率高达 74.6%, 远高于降雨因素的贡献。花山站呈现与嵊州站相似的特征, 人类活动是变化期径流量减少的主要原因。

(3) 黄泽站变化期与基准期相比, 径流减少了 $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$, 其中, 由于降雨减少造成的径流量变化为 $-1.5 \text{ m}^3/\text{s}$, 降雨因素的贡献率高达 177.2%, 而人类活动对径流变化造成反向增加的影响, 增加值为 $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$, 人类活动的贡献率为 -77.2%。降雨因素和人类活动对径流变化作用相反, 呈现与嵊州站和花山站不同的径流变化特点。降雨量减少是造成黄泽站径流量减少的主要原因。

位于曹娥江干流的嵊州站和花山站表现出相似的径流变化特征, 人类活动对径流量减少的影响超过 70%, 是径流变化的主导因素。人类活动的影响体现在:

(1) 用水量需求增大。随着近年来城镇社会发展和居民生活需要, 各地用水量大幅增加。2003 年绍兴市遭遇 50 年一遇严重干旱, 加上持续高温, 使居民生活和工业生产用水量飙升。

(2) 供水能力增强。为满足用水需求, 保障用水安全, 引水、蓄水和供水工程不断完备, 对径流的调控幅度也随之增大。上游南山水库、辽湾水库、长诏水库和钦寸水库是绍兴市的重要水源地。除为沿途城镇供水外, 在浙江省投入建设的“浙东引水工程”中, 曹娥江成为解决浙东地区缺水问题的重要水源。

(3) 防洪力度加大。曹娥江上游环山, 自古洪涝频发, 水土流失严重, 防洪排涝措施能有效削减洪峰, 调节水文过程。曹娥江花山站以上有长诏、南山和钦寸 3 座大型水库以及巧英、门溪、丰潭、辽湾、剡源、坂头和五丈岩 7 座中型水库, 承担防洪和供水功能。近年来, 浙江省启动“千库保安工程”, 对曹娥江上游水库进行除险加固, 并着手建设信息管理系统及时获取河道信息和下达调控指令。

人类活动对黄泽江径流量起到了增加作用。一方面, 自 2000 年以来持续对黄泽江实施河道清淤、植树保土、滩地修复及堰坝改造等综合治理工程, 显著改善了水环境; 另一方面, 位于黄泽江中段的钦寸大型水库自 2009 年起投入建设, 工程涉及大批水库移民和大量耕地变化, 降低了区域用水需求, 同时工程建设期直接改变了河流水文特征。

随着径流研究方法的不断拓展, 从径流序列数据中可以解读出更为丰富的信息, 并可根据实测数据的长度和精度、具体研究目标及不同方法优势, 选

择合适的研究方法组合。近年来随着经济社会的发展, 全国各地用水需求日益增长, 合理开发利用水资源是区域可持续发展的重要议题。曹娥江是绍兴市重要水源, 承载着水资源保障和防洪排涝的功能, 应深入研究曹娥江径流变化规律, 以便合理地在水资源进行时空调配, 充分发挥水利工程对径流的调节作用, 完善水资源管理体系。同时, 应因地制宜, 结合区域发展特征, 促进产业结构转型升级, 推广工农业生产节水技术, 科学提高用水效率。后续研究一方面需结合产业结构数据, 对曹娥江流域进行用水特征分析, 提出区域水资源配置方案和产业发展建议; 另一方面需加强气候变化和人类活动对径流变化影响的机理研究, 实现径流模拟预测。

4 结 论

本文利用曹娥江中上游嵊州站、黄泽站和花山站 3 个水文站 1980 - 2018 年的月径流数据, 结合多种径流研究方法, 包括线性倾向率法、Mann - Kendall 趋势及突变检验法、滑动 t 检验法、距平百分率、不均匀系数、集中期和集中度、极值比和双累积曲线等方法, 对曹娥江中上游径流量年际变化规律、年内分配特征及径流量变化归因进行研究, 得到了较为全面的区域径流信息。主要结论如下:

(1) 1980 - 2018 年嵊州站、黄泽站、花山站年平均径流均呈现下降趋势, 气象倾向率分别为 -1.39 、 -0.11 、 $-1.98 (\text{m}^3/\text{s})/10\text{a}$ 。多年径流特征值表明, 1980 - 2018 年黄泽站年平均径流量变动最大, 其次为花山站, 嵊州站年平均径流量变动最小。季节性变化方面, 春季 3 个水文站平均径流均呈显著减少趋势, 冬季黄泽站呈显著增大趋势。结合 M - K 突变检验法和滑动 t 检验法, 嵊州站和花山站年平均径流量在 2003 年发生突变, 黄泽站年平均径流量无明显突变点。1980 - 2018 年嵊州站丰水年所占比例最大, 为 25.6%; 黄泽站枯水年所占比例最大, 为 25.6%; 花山站枯水年所占比例最大, 为 28.2%。

(2) 在 1980 年代、1990 年代、2000 年代、2010 - 2018 年及 1980 - 2018 年 5 个研究时段内, 嵊州站、黄泽站及花山站的径流年内分配过程线均呈“三峰”形态, 峰值分别出现在 3 - 4 月、6 月和 8 - 9 月, 峰值表现为“低 - 高 - 低”的特征。曹娥江中上游多年径流年内分配比例, 春季占比为 27.5%, 夏季占比为 38.8%, 秋季占比为 19.8%, 冬季占比为 13.8%; 汛前占比为 20.3%, 汛期占比为 66.5%, 汛后占比为 13.1%。嵊州站和花山站 2010 - 2018 年

径流年内分配最为不均匀,2000年代径流年内分配最为均匀,1980年代径流年内相对变化幅度最大且分配最为集中,2000年代相对变化幅度最小且集中程度最低。黄泽站1980年代径流年内分配最为不均匀、相对变化幅度最大且集中程度最高,2000年代径流年内分配最为均匀、相对变化幅度最小且集中程度最低。

(3)将研究时期划分为1980-2002年(基准期)和2003-2018年(变化期)两个阶段。变化期与基准期相比,嵊州站降雨因素对径流量变化的贡献率为26.8%,人类活动的贡献率高达73.2%,远高于降雨因素的贡献;黄泽站降雨因素的贡献率高达177.2%,而人类活动对径流量变化造成反向增加的影响,贡献率为-77.2%;花山站降雨因素的贡献率为25.4%,人类活动的贡献率高达74.6%。对于嵊州站和花山站,人类活动是变化期径流量减少的主要原因,而降雨因素是造成黄泽站径流量减少的主要原因。

参考文献:

- [1] 郑连生. 广义水资源与适水发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [2] IPCC. Climate change 2014: Synthesis report[R]. Geneva, Switzerland: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- [3] 王国庆, 张建云, 管晓祥, 等. 中国主要江河径流变化成因定量分析[J]. 水科学进展, 2020, 31(3): 313-323.
- [4] LIU Ning, HARPER R J, SMETTEM K R J, et al. Responses of streamflow to vegetation and climate change in southwestern Australia[J]. Journal of Hydrology, 2019, 572: 761-770.
- [5] 严栋飞, 解建仓, 姜仁贵, 等. 汉江上游径流变化趋势及特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(6): 13-19.
- [6] 孙栋元, 齐广平, 马彦麟, 等. 疏勒河干流径流变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 557-567.
- [7] 王乐扬, 李清洲, 王金星, 等. 变化环境下近60年来中国北方江河实测径流量及其年内分配变化特征[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 36-42.
- [8] 王青, 刘招, 陶望雄. 基于洛伦兹曲线的泾河张家山站径流及降雨分布不均匀性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 119-122+127.
- [9] 王小杰, 姜仁贵, 解建仓, 等. 基于分形和R/S分析的渭河干流径流变化特征研究[J]. 水利水运工程学报, 2019(1): 102-108.
- [10] 范琳琳, 王红瑞, 来文立, 等. 基于HHT的径流变化特征分析及验证[J]. 水力发电学报, 2015, 34(5): 10-18+50.
- [11] 谢平, 陈广才, 雷红富, 等. 水文变异诊断系统[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 85-91.
- [12] 刘星根, 李昌彦, 吴敦银. 近60年赣江水沙变化特征及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(11): 1920-1928.
- [13] 刘阳容, 刘刚. 不同资料长度建立相关关系对径流插补延长成果影响[J]. 云南水力发电, 2020, 36(2): 24-27.
- [14] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956-2018年中国江河径流演变及其变化特征[J]. 水科学进展, 2020, 31(2): 153-161.
- [15] 李琬欣, 熊东红, 张素, 等. 四川凉山州孙水河流域近60年来径流趋势特征分析[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 130-137.
- [16] 吴喜军, 李怀恩, 孙志勇, 等. 陕北窟野河年径流变化特征分析与诊断[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(4): 558-562.
- [17] 杨远东, 王永红, 蔡斯龙, 等. 1960-2017年珠江流域下游径流年际与年内变化特征[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 23-31.
- [18] ZHANG Lujun, QIAN Yongfu. Annual distribution features of precipitation in China and their interannual variations[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 17(2): 146-163.
- [19] 陈锡云, 郭东静, 高晓栋, 等. 泾河合水川流域近50年径流演变特征及影响因素分析[J]. 地理科学, 2016, 36(1): 114-120.
- [20] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.