

Spatiotemporal Variability of Flashiness Index in the Minjiang River

Jun Zhao¹, Zheyu Xie², Jinliang Huang^{2*}, Zuya Huang³

¹Scientific Research Academy of Guangxi Environmental Protection, Nanning Guangxi

²Fujian Key Laboratory of Coastal Pollution Prevention and Control (Xiamen University), Xiamen Fujian

³Bureau of Hydrology and Water Resources of Fujian Province, Fuzhou Fujian

Email: *jlhuang@xmu.edu.cn

Received: Dec. 18th, 2019; accepted: Dec. 31st, 2019; published: Jan. 7th, 2020

Abstract

The Minjiang river basin, the largest river in Fujian Province, was chosen to analyze the characteristics of the runoff variation with Flashiness Index and Baseflow Index for Minjiang four tributaries: Jianxi, Dazhangxi, Futunxi and Shaxi rivers, based on the sixty-year daily streamflow data from 1951 to 2012 and thirty-five-year daily sediment discharge data from 1978 to 2012. Geographical information system and Mann-Kendall test were coupled to characterize the spatiotemporal variation of the runoff and identify its influencing factor. The results show that the stream runoff characteristics in Minjiang river basin were altered significantly in the past 60 years, represented by a decreasing trend for FI in Funtunxi and Jianxi rivers and an increasing trend for baseflow in Minjiang four tributaries. The jumping points of sediment discharge in the four tributaries arise in the year of 1984, 1993 (2000), 1996 (1998), 1991 (2006) and the year 1997. However, the jumping point of FI only arose in the Jianxi River at year 1968 and 1970. The fluctuation of streamflow influenced by hydropower development construction is not sensitive. Dam construction and hydropower cascade development have changed the characteristic of sediment discharge in Minjiang watershed.

Keywords

Flashiness Index, Runoff Variation, Hydropower Development, Land Use Change, Watershed

闽江径流FI指数时空变化分析

赵 军¹, 谢哲宇², 黄金良^{2*}, 黄祖亚³

¹广西环境保护科学研究院, 广西 南宁

²福建省海岸带污染防控重点实验室(厦门大学), 福建 厦门

³福建省水文水资源勘测局, 福建 福州

作者简介: 赵军(1961-), 男, 壮族, 广西百色人, 高级工程师, 主要研究方向为环境工程。

*通讯作者。

文章引用: 赵军, 谢哲宇, 黄金良, 黄祖亚. 闽江径流 FI 指数时空变化分析[J]. 水资源研究, 2020, 9(1): 82-93.

DOI: 10.12677/jwrr.2020.91009

Email: *jlhuang@xmu.edu.cn

收稿日期: 2019年12月18日; 录用日期: 2019年12月31日; 发布日期: 2020年1月7日

摘要

以福建省最大的流域闽江流域为研究对象, 基于1951~2012年近60年的日径流量资料和1978~2012近35年的输沙率资料, 利用Flashiness Index (FI)和基流指数, 借助Mann-Kendall趋势检验方法、GIS技术来识别闽江干流和建溪、大樟溪、富屯溪、沙溪四大支流近60年来径流时空变化特征及其影响因素。研究表明, 闽江流域近60年来径流特征发生显著的变化, 大樟溪、富屯溪、建溪的FI指数显著下降, 四个支流、干流的基流指数均呈现出显著上升的趋势。闽江干流、沙溪、富屯溪、大樟溪和建溪的输沙率分别在1984、1993 (2000)、1996 (1998)、1991 (2006)和1997年出现拐点, 而FI指数仅在建溪有出现拐点, 时间为1968年和1970年。由于闽江流域尺度较大, 水电开发持续时间长, 闽江流域径流的波动性受水电开发建设的影响并不敏感。大坝建设、水梯级开发改变了闽江流域的泥沙输出特征。该研究结果可为流域水资源管理提供科学依据。

关键词

FI指数, 径流变化, 水电开发, 输沙率, 流域

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

河川径流是人类有限的、可利用的淡水资源的主要来源。在气候变化和人类活动双重压力下, 河川径流已经发生很大的变化[1], 研究其时空变化特征及其驱动机制对流域水资源管理具有重要意义。

流域径流量的年际变化特征是探究河川径流水文过程的前提, 也是水文过程研究的重要内容[2] [3]。近20年来, 国内外的学者们提出多种方法分析河川径流的变化特征, 例如径流的集中度和集中期、不均匀系数、完全调节系数、变化幅度等研究[4]。总体而言, 对于河川径流的水文变化的研究已经从一开始的只注重平均流量, 到之后开始广泛关注包括极端流量、径流速率和极端径流发生时间等, 到构建指标体系描述水文过程的改变[5]。Robertson 等和 Werkhoven 等通过流量曲线的斜率对流域径流量变化进行初步分析[6] [7], Merz 利用最大洪峰流量与日均流量分析河川径流的变化[8]。但相关研究无法消除气候变化等自然因素带来的影响, 基于此, Baker 在 2004 年引入了 Flashiness 指数定量分析河川径流的变化特征[9], 该指数的变化与降水状况(强度、降水量)、气候变化等自然因素无明显相关性, 与流域的地理条件、水文环境有较为明显的相关性[3] [9], 对大坝建设、土地利用变化等因素也有较高的敏感性。目前 Flashiness 指数多应用于国外大坝建设、土地利用变化等对流域水文条件影响的评估[3] [9] [10] [11] [12]。国内也有学者应用 Flashiness 指数对福建省九龙江流域径流量波动性和输沙率变化之间的关系进行探讨[13], 但相关研究多集中于中小尺度流域, 而对于大尺度流域的研究却少有报道。

闽江是福建省第一大流域, 其水资源丰枯直接影响着全省一半地区的水安全, 对全省社会经济的可持续发展乃至生态安全, 具有举足轻重的影响。且近年来闽江流域的土地利用变化剧烈, 大坝建设、水电开发力度大[14]。因此, 对水电开发等人类活动导致的径流波动性及输沙率等水文特性变化进行评估具有重要意义。本文以

闽江流域为研究对象, 基于近 60 年的日径流量和近 35 年日输沙率数据, 计算其 Flashiness 指数, 并对指数的变化趋势及变异点进行分析, 旨在评估大坝建设等人类活动对闽江流域径流和输沙率时空变化特征的影响, 为流域水资源管理提供科学依据。

2. 资料和方法

2.1. 研究区域

闽江流域位于东经 116°23'~119°43', 北纬 25°23'~28°19'之间, 属于亚热带海洋季风气候区, 流域内的植被较好, 气候温和, 雨量充沛, 是福建省最大的河流, 发源于武夷山脉, 流经 36 个县(市), 全长 541 km, 流域面积 60,992 km²。其中, 福建省境内面积 59,922 km², 占流域面积的 98.2%, 约占福建省面积的一半; 属浙江省境内面积 1070 km², 占流域面积的 1.8%。

闽江流域状如扇形, 地势西北高东南低, 南平以上有建溪、富屯溪和沙溪三大支流发源于武夷山脉, 平均海拔较高, 地形较为复杂, 险滩多, 水流湍急, 流态紊乱, 具有水位暴涨暴落的山区河流的特点。南平以下为闽江干流, 自南平到闽江入海口, 沿途有吉溪、尤溪、古田溪、梅溪、大樟溪等支流汇入。大樟溪发源于德化县戴云山主峰西面, 是闽江下游最大的支流, 地形同样复杂, 水流落差较大, 具有山区性河流特点。闽江干流下游逐渐从丘陵区过渡到福州平原, 海拔较三大支流明显较低, 水面落差较小。闽江下游在淮安分南北两港, 北港绕南台岛北面, 穿过福州市区至马尾与绕过南台岛南面的南港相汇, 再流经闽安镇被琅岐岛分为南北两支, 南支经长乐县梅花镇, 北支经连江县琯头镇流入北海(图 1)。

据调查, 20 世纪 50 年代后期至今, 闽江流域中上游的干流和支流修建了大型水库 7 座, 中型水库 60 多处和一些小型水库[15], 其中主要的大型水库的水利工程建成情况见表 1。至今这些大中型水库相继建成蓄水, 主要用于发电、防洪与灌溉[16], 重点用于调节年内径流, 对径流的年际变化影响可能较小[15]。大型水库对洪水有一定的自然调蓄功能, 此外为了下游的防洪的需要, 还需进行防洪错峰调度, 以降低下游的洪峰流量。大型水库对径流的年内分配也产生了一定的影响, 它们在一定程度上加大了枯水季节的径流量。使下游河道枯水期日平均流量和月平均流量相对增加, 径流的年内分配较均匀, 从而降低了径流的年内的波动性, FI 值也相应的降低。由于闽江流域范围广, 年径流量大, 支流分布多, 水电开发的年限较长, 因此水电的开发对径流的年内分布作用并不明显, 但同样对降低径流的年内波动性起到了一定的影响。另外, 闽江干支流绝大多数梯级电站建成于 1993 年, 特别是 2000 年以后, 目前流域梯级电站开发率达到 85%, 水口水库以上流域主要一级支流干流上已建梯级水电站 24 座, 二、三级支流上的梯级小水电站有数百座[17]。水电站建设过程中产生了大量的泥沙倒入河流中, 建成后对河流的泥沙起到了拦截作用。

Table 1. Statistics of the main water engineering projects in the Minjiang watershed

表 1. 闽江流域主要水利工程统计[15]

工程项目	所在河流	控制面积/km ²	总库容/10 ⁸ m ³	建成时间
水口水库	闽江	52,438	26.00	1993~1996 年
池潭水库	金溪(富屯溪水系)	4766	8.53	1980 年
安砂水库	沙溪	5184	7.40	1978 年
古田溪水库	古田溪(汇入干流)	1325	6.25	1959~1971 年
沙溪口水库	沙溪、富屯溪汇合处	25,562	1.64	1989 年
水东水库	尤溪(汇入干流)	3784.5	1.10	1994 年
东溪水库	崇阳溪(建溪水系)	554	1.02	1986 年

注: *古田溪水库分为 4 个阶段建设, 第一阶段建成是 1959 年, 最终完成是在 1971 年。

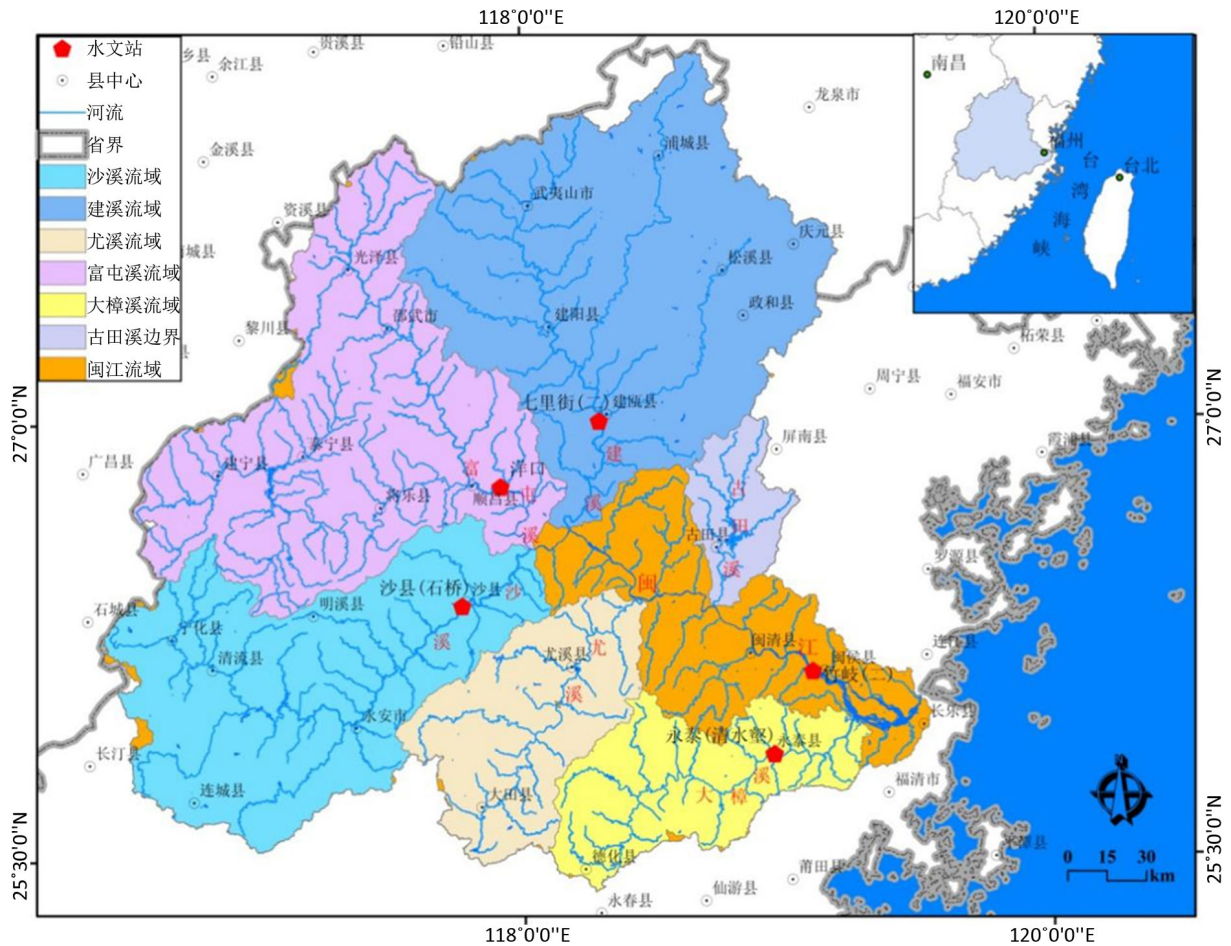


Figure 1. Location of Minjiang watershed study area
图 1. 闽江流域研究区域概况图

2.2. 数据来源和研究方法

1) Flashiness 指数。水文资料选取闽江流域的干流(竹岐)、沙溪(沙县石桥)、富屯溪(洋口)、大樟溪(永泰清水)、建溪(七里街)水文站近 60 年来的日径流量监测数据。基于 Baker 等人[7]提出的 Flashiness 指数分析闽江流域径流量的时空变化, 其计算公式如下:

$$FI = \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - q_{i-1}|}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (1)$$

式中: FI 为 Flashiness 指数; q 为日均径流量; i 为天数, $n = 365$ (366)。FI 是一个无量纲的指数值, 介于 0~2 之间[12]。FI 趋于 0 表示流域的径流波动越小, FI 趋于 2 表示流域的日径流量波动就越大。

2) 基流分离及基流指数(BFI)的计算。本研究采用数字滤波法进行基流的分割, 滤波法较传统的图解法具有更加客观, 操作简便等优点[18]。本研究基于 Lyne-Hollick 算法进行基流的分离及基流指数的计算。

3) Mann-Kendall 趋势检验。近年来 Mann-Kendall 检验被广泛应用于 FI 值、BFI 值的变化趋势检验[19]。Kendall τ 相关系数用非参数检验的方法来度量定序变量间的线性相关关系。

Kendall τ 相关系数的检验统计量计算公式如下[18]:

$$\tau = \frac{2(U - V)}{n(n - 1)} \tag{2}$$

式中： τ 为 Mann-Kendall 相关系数； U 是一致对数目； V 为非一致对数目； n 为样本数。

当 U 值较大、 V 值较小时，两变量呈较强的正相关；当 U 值较小， V 值较大时，两变量呈较强的负相关；如果 U 值和 V 值相近时，两变量呈较弱的相关关系。

3. 结果与分析

3.1. 闽江流域径流 Flashiness 指数时空变化特征

闽江干流、四条支流的 Flashiness 指数发生了明显的变化。近 60 年 Flashiness 指数经 Mann-Kendall 分析可见(表 2)，其 τ 值均小于 0，大樟溪流域和建溪流域的 P 值小于 0.01，富屯溪的 p 值小于 0.05。这说明近 60a 来闽江流域的年内径流波动性呈现出下降的趋势，其中富屯溪显著下降，大樟溪和建溪呈现出极显著的下降趋势，沙溪和闽江干流下降趋势不明显(图 2)。总体而言，大樟溪和建溪的径流波动性更大，表现在 FI 值比其他流域更大(见表 3)。

Table 2. FI trend test results of the main stream and four tributaries of Minjiang River in recent 60 years

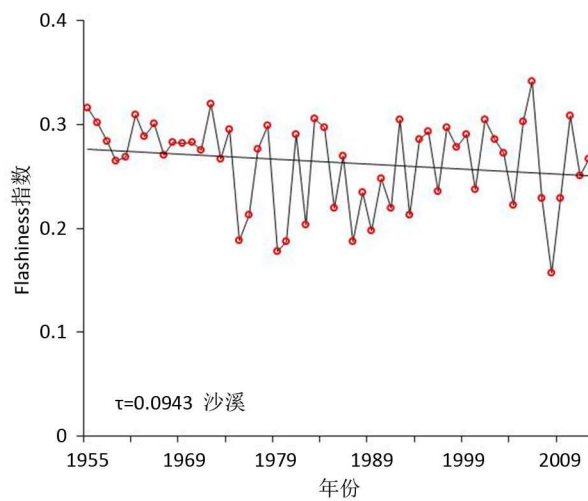
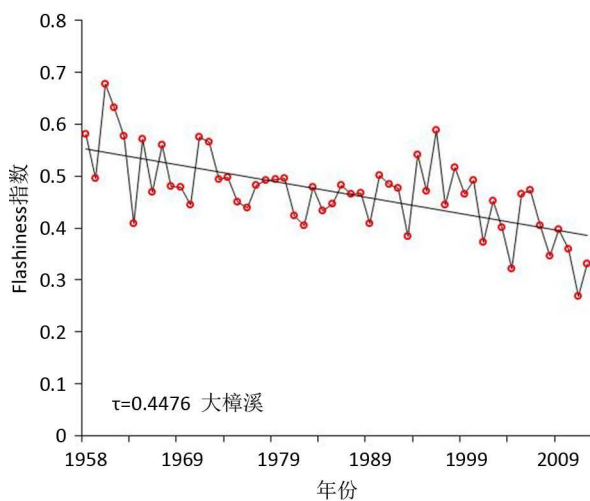
表 2. 闽江干流、四条支流近 60 年 FI 值趋势检验结果

河流名称	τ	p	显著性	水文站点
建溪	-0.2734	0.0021	极显著	七里街
富屯溪	-0.2164	0.0140	显著	洋口
沙溪	-0.0943	0.3175	不显著	沙县石桥
大樟溪	-0.4476	0.0000001	极显著	永泰清水
闽江干流	-0.0988	0.2548	不显著	竹岐

Table 3. The statistics of Flashiness indexes of the Minjiang watershed during 1951-2012

表 3. 闽江干流及四条支流近 60 年 FI 值统计特征

河流名称	FI 最大值	FI 最小值	FI 平均值
建溪	0.43	0.26	0.34
富屯溪	0.36	0.19	0.29
沙溪	0.34	0.16	0.26
大樟溪	0.68	0.27	0.47
闽江干流	0.38	0.16	0.25



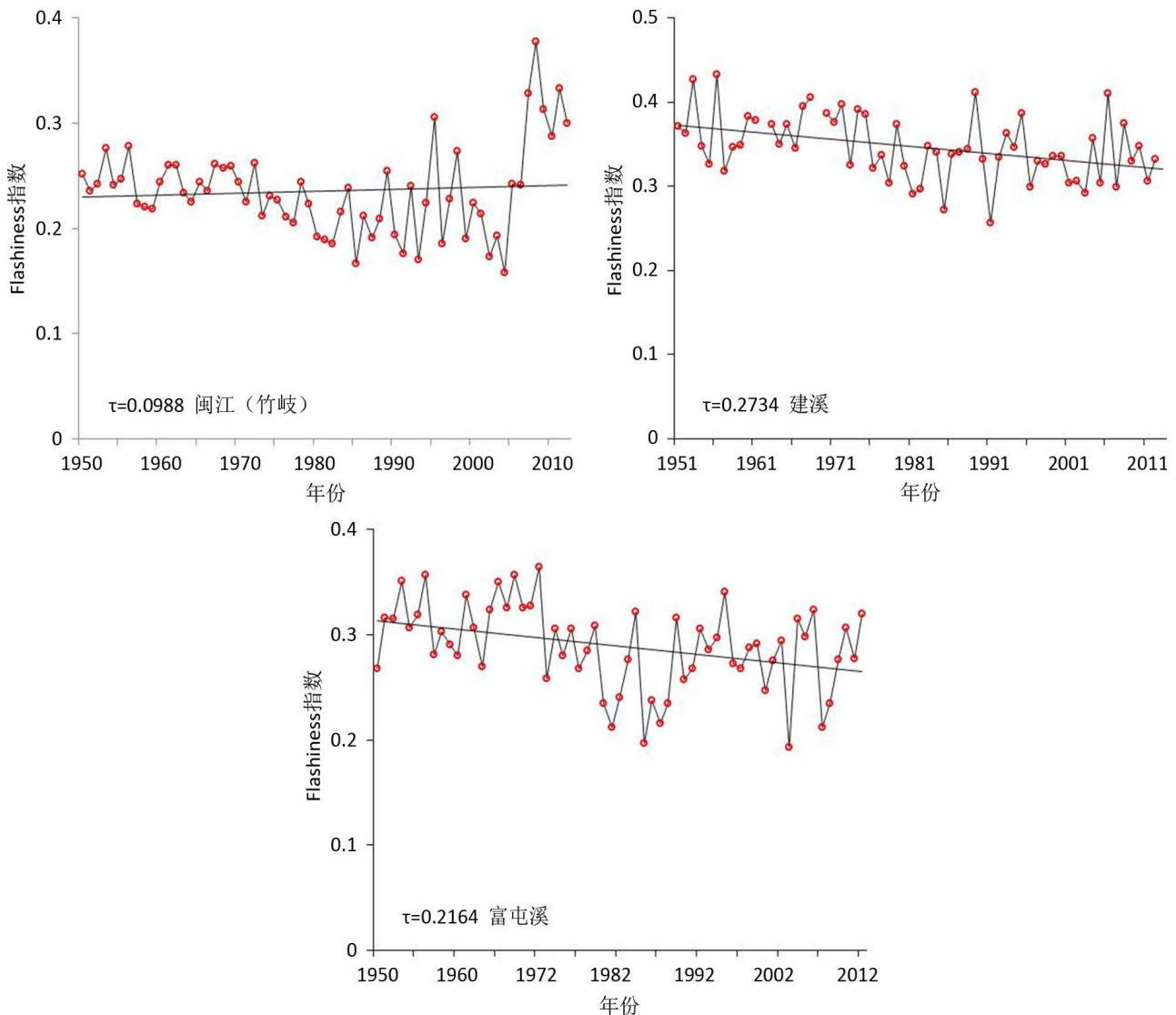


Figure 2. Streamflow flashiness indexes of Minjiang watershed during 1950-2011

图 2. 1950~2012 年闽江干流及支流 Flashiness 指数

3.2. 闽江流域 BFI 指数的时空变化特征

近 60a 来, 闽江干流、沙溪、大樟溪、富屯溪、建溪的基流指数(BFI)也发生了明显的变化(图 3)。经 Mann-Kendall 分析(表 4), 其 τ 值分别为 0.2135、0.3319、0.5234、0.2367、0.3141 且绝对值都在 0.2 以上, 闽江干流 p 值小于 0.05, 其他支流的 p 值均小于 0.01, 说明近 60a 来闽江干流基流指数呈显著的上升趋势, 其他支流的基流指数呈极显著的上升趋势。由图 3 和表 4 可见, 闽江流域的基流指数呈明显的时空变异特征, 即闽江干流、沙溪、富屯溪的基流指数明显高于建溪和大樟溪, 且都呈现出显著的上升趋势。说明影响闽江干流和四条支流河流径流量的水文地理条件发生了明显的年际变化。

3.3. 水电开发对闽江流域 Flashiness 指数变异点影响

基于闽江流域 1950~2012 年近 60 年的日径流量数据由 2.2 计算得出近 60a 闽江流域 Flashiness 指数, 并对 FI 指数进行变异点分析, 结果见图 4。

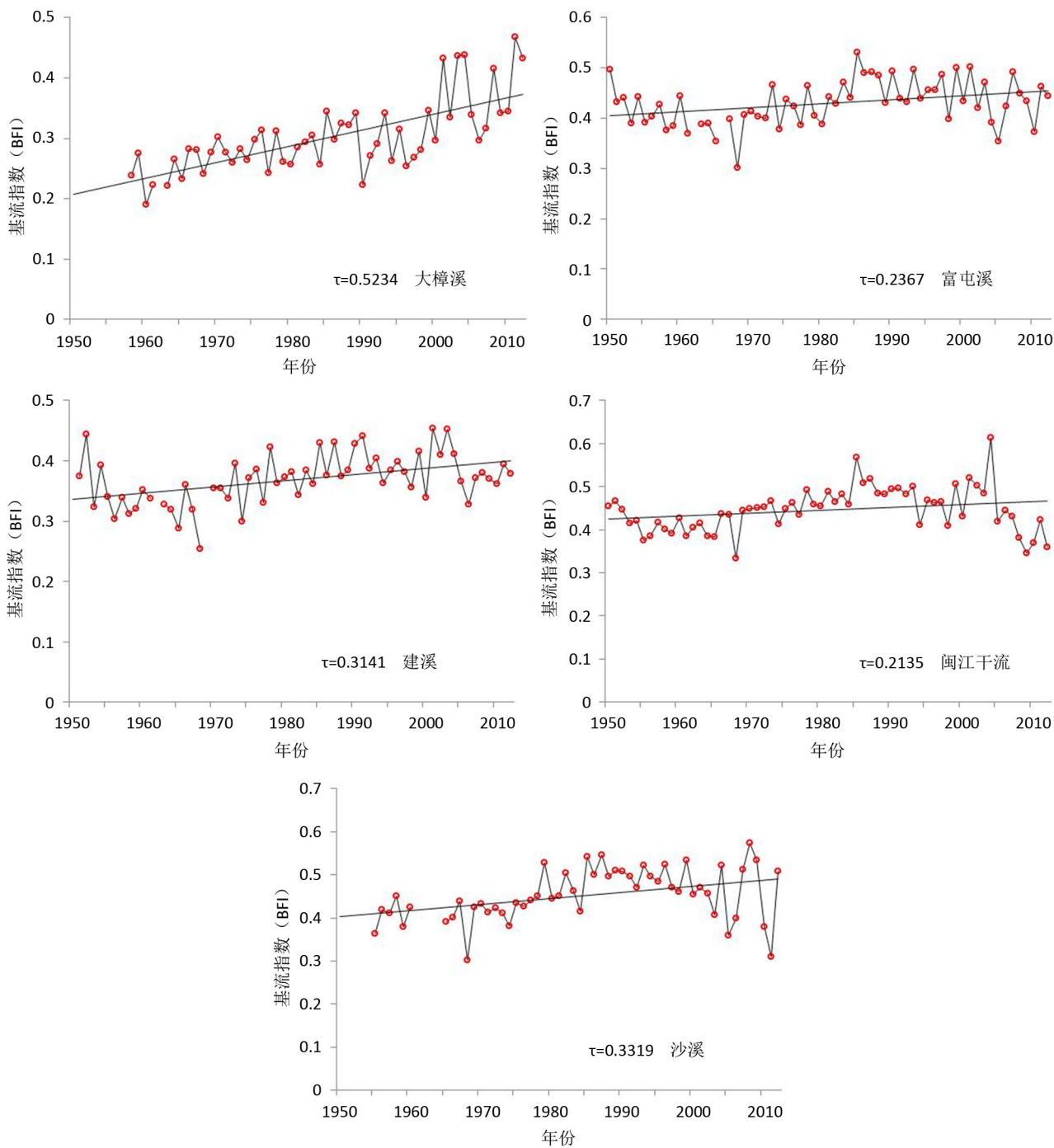


Figure 3. The baseflow indexes of Minjiang watershed during 1950-2012

图 3. 1950~2012 年闽江干流与四大支流 BFI 指数

Table 4. The results of M-K analysis in Minjiang River in 1950-2012

表 4. 1950~2012 年闽江干流、四大支流 BFI 值的 M-K 检验结果

河流名称	τ	p	显著性
建溪	0.3141	4.0051e-4	极显著
沙溪	0.3319	4.0588e-4	极显著

Continued

富屯溪	0.2367	0.0072	极显著
大樟溪	0.5234	2.3999e-8	极显著
闽江干流	0.2135	0.0136	显著

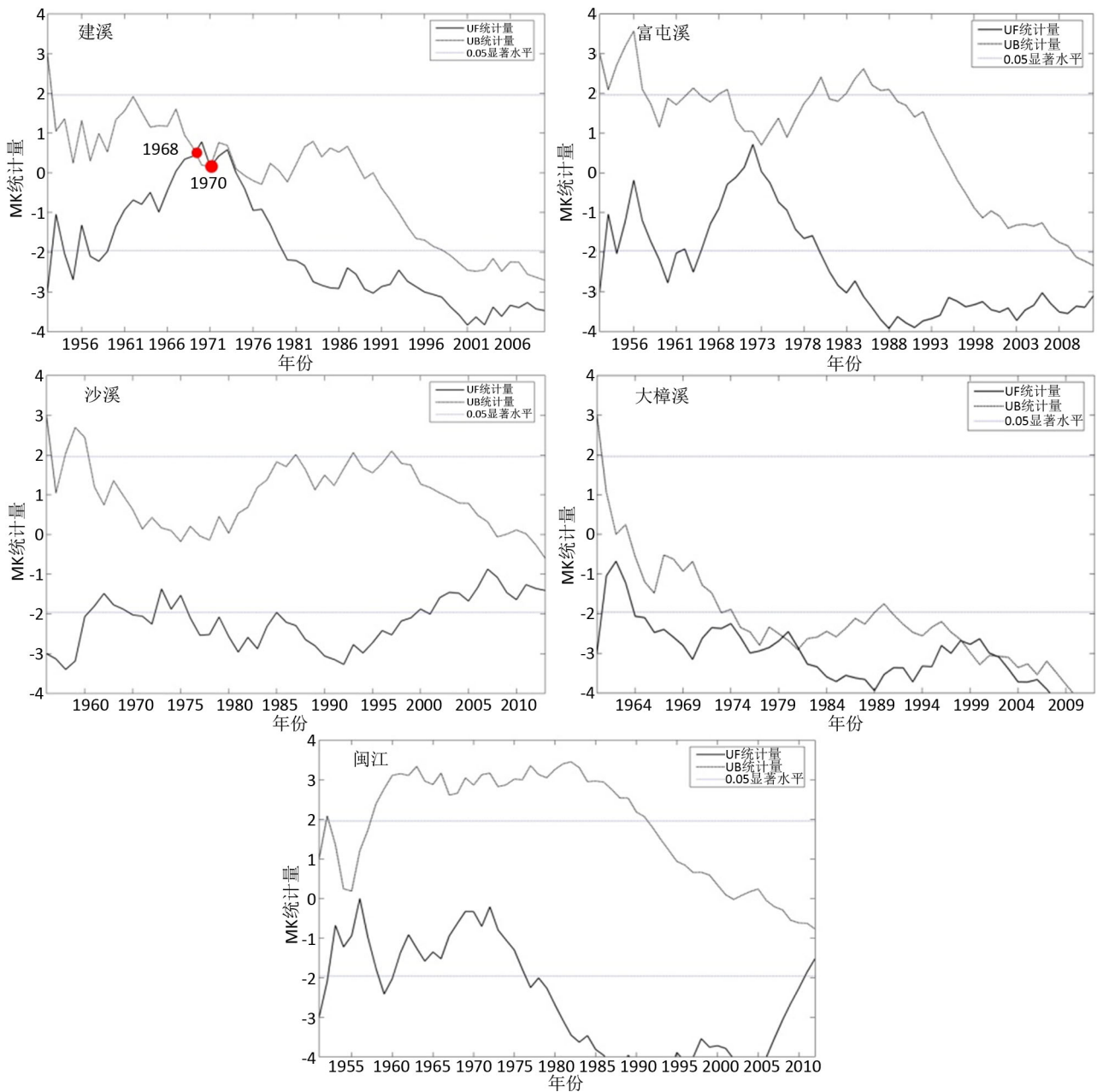


Figure 4. Jumping point analysis of Flashiness in Minjiang River

图 4. 闽江干流及支流 FI 指数变异点分析

由图 4 可见，闽江干流及四条支流的 Flashiness 指数仅在建溪有出现变异点，时间是 1968 年和 1970 年。据调查，闽江流域大坝建设、水电开发开始于 50 年代至今，其干支流绝大多数梯级电站建成于 1993 年，特别是 2000 年以后，目前流域梯级电站开发率达到 85%，但是根据各流域变异点分析结果显示，只有建溪流域的 FI

值分别在 1968 年和 1970 年出现拐点，其他流域 FI 指数在近 60 年甚至没有出现拐点。这说明闽江流域径流的波动性受水电开发建设的影响并不敏感。闽江是福建省最大的河流，流域面积约占福建省陆域总面积的一半，流域尺度较大，水库分布在流域的各干支流，这可能是造成水电开发建设对径流波动性变化影响不明显的原因。另一方面，闽江流域水电开发的持续较长，也可能是闽江径流波动性变化不明显的原因。从 50 年代中后期起大型水库开始兴修水利，还有 60 座中型水库也是这段时间开始兴修。

3.4. 水电开发对输沙率变异点的影响

本文基于竹岐(闽江干流)、沙县石桥(沙溪)、洋口(富屯溪)、永泰清水(大樟溪)、七里街(建溪)五个水文站点收集的 1978~2012 年近 35 年的日输沙率数据进行变异点分析，结果见图 5。

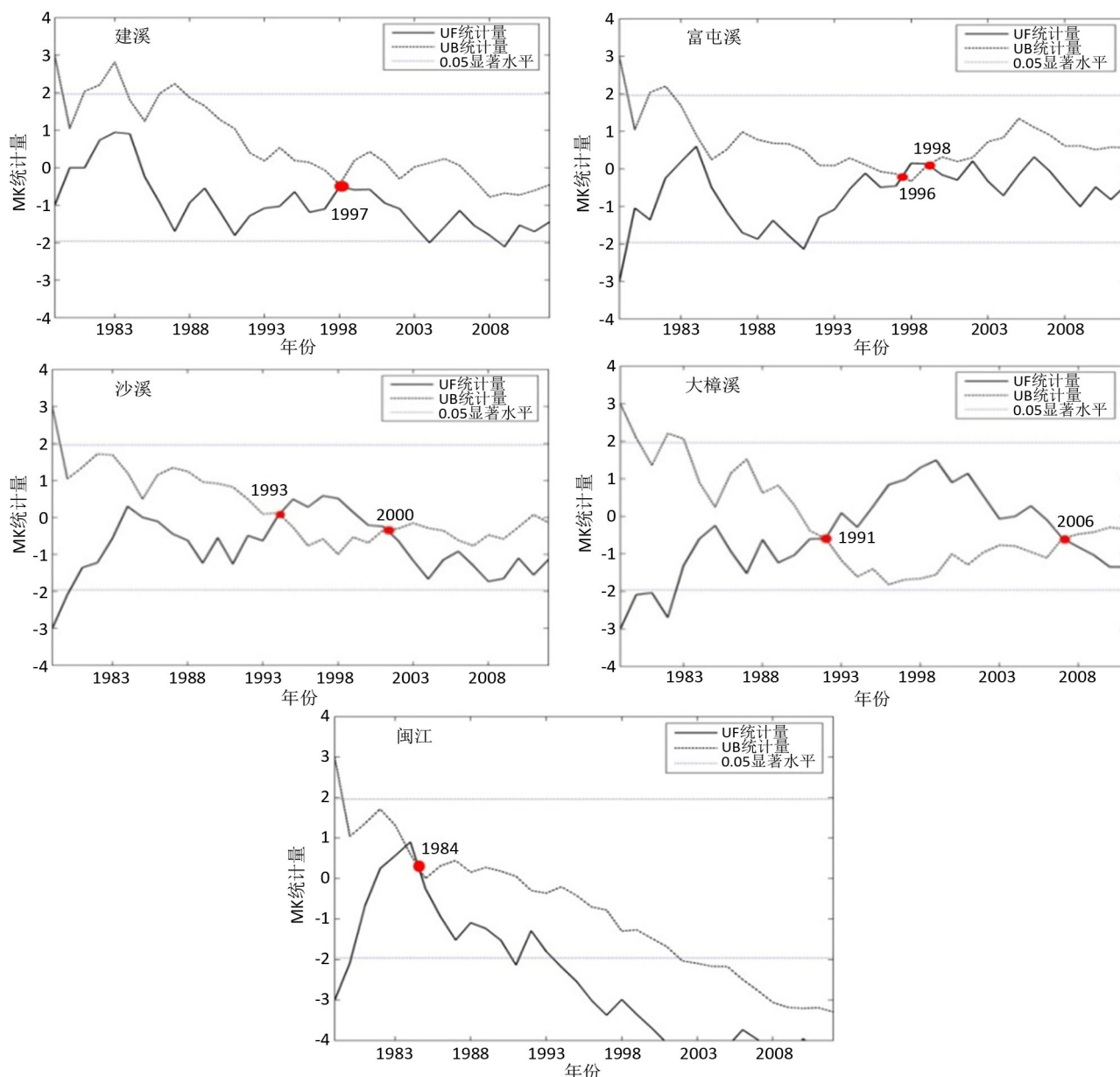


Figure 5. Jumping point analysis of sediment discharge over the past 35 years

图 5. 闽江干流及四条支流近 35 年输沙率变异点

由图 5 可见, 闽江干流、沙溪、富屯溪、大樟溪和建溪的输沙率分别在 1984、1993 (2000)、1996 (1998)、1991 (2006) 和 1997 年出现变异点。除闽江干流竹岐水文站点输沙率拐点时间为 80 年代, 其余四条支流所对应的水文站点的输沙率拐点均分布在 90 年代至 2000 以后, 即处于闽江流域梯级电站开发的高峰期。因此对 1978~1992 年和 1993~2012 年两个时间段的年平均输沙率进行对比(见表 5)。由表 5 可知, 1993 年前后各水文站点所测得的年平均输沙率均发生了一定的变化, 这反应了水电站的梯级开发使得闽江流域输沙率发生了明显变化, 从而出现了变异点。闽江干支流绝大多数梯级电站建成于 1993 年, 特别是 2000 年以后, 目前流域梯级电站开发率达到 85%, 大规模的梯级电站建设过程中, 大量的泥沙排入到流域中, 使得河流的输沙量增加。而这些水库的建成后, 如同一个个巨型沉沙池, 沉积了上游的大量的泥沙, 使得下泄的河水的含量明显减少。

Table 5. Comparison of the sediment discharge around the year 1993

表 5. 闽江干流及支流水文站点 1993 年前后年均输沙率变化/kg/s

时段	竹岐	七里街	沙县石桥	洋口	永泰清水
1978~1992 年	201.44	42.88	31.28	27.52	25.79
1993~2012 年	84.40	30.34	33.42	59.62	31.78
变化率/%	58.1	19.24	6.8	116.64	23.23

4. 讨论

近 60 年来, 闽江流域的建溪和大樟溪的 FI 值呈极显著的下降趋势(流域尺度), 富屯溪的 FI 值显著下降, 而闽江干流与沙溪 FI 也呈现一定的下降趋势, 但是下降趋势并不明显。FI 值下降的同时, 各流域的 BFI 值却随之上升。Deelstra 等人的研究发现 FI 值的变化与 BFI 值的变化呈现显著负相关关系[10], 这与本研究相符合。

黄金良等人对九龙江流域的北溪和西溪径流的 FI 指数进行变异点研究分析发现, 九龙江流域的北溪与西溪的 FI 指数的变异点都为 1992 年[13], 九龙江水利资源蕴藏量十分丰富, 随着 1995 年北溪的万安溪水电站、1996 年西溪的鸿明电站的相继建成, 九龙江流域的水电开发力度逐渐加大。变异点出现的时间与水电站开始建设的时间基本一致, 说明九龙江流域径流的波动性受水电开发建设的影响较为敏感。而本文所研究的闽江流域 FI 指数只有建溪出现变异点, 时间分别为 1968 年和 1970 年, 其他流域并没有出现变异点, 这与水电站梯级开发力度较大的 90 年代在时间上并不一致, 说明闽江流域径流的波动性受水电开发建设影响并不敏感。造成两者的差异的原因可能是受流域尺度大小的影响, 闽江流域面积较大为 60,992 km² 占福建省陆地面积的一半, 且支流众多, 径流的波动性受水利工程的影响较小, 而九龙江流域北溪面积 9083 km², 西溪面积 3946 km², 流域面积相比闽江较小, 径流的波动性受水利工程影响较为敏感。相关研究也表明, 水利工程对河道水沙变化的影响受到流域尺度的影响, 流域尺度越小, 河道水沙变化受水利工程的影响就越敏感, 其滞后性就越短[20]。闽江流域的输沙率近 35a 出现了明显变化, 而水电的大力开发是一个重要的影响因素。刘新有的研究表明, 水电开发对河流的水沙特性的影响较小, 对输沙的影响程度远大于径流影响程度[21]。本研究分析结果与该研究规律相符, 表明本研究结果科学可靠。

5. 结论

1) 近 60 年来闽江干流及四条支流的径流特征与水文环境发生了一定的变化, 表现在 FI 值的下降和 BFI 值的上升。具体为富屯溪显著下降, 大樟溪和建溪呈现出极显著的下降趋势, 沙溪和闽江干流下降趋势不明显, 总体而言, 大樟溪和建溪的径流波动性更大, 表现在 FI 值比其他流域更大。

2) 由于闽江流域尺度较大, 水电开发持续时间长, 闽江流域径流的波动性受水电开发建设的影响并不敏感, 只有建溪的 FI 值在 1968 年和 1970 年产生变异点。

3) 水电站的梯级开发是造成闽江流域输沙率产生变异点的一个重要因素。

基金项目

福建省水利厅项目(FJSW2013038)。

参考文献

- [1] 黄强, 赵雪花, 刘俊萍, 等. 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 Qiang, ZHAO Xuehua, LIU Junping, et al. Time-series analyzing and forecasting stream-flow: Principle and method. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2008. (in Chinese)
- [2] 罗寿泰, 黄祖亚. 闽江流域水资源质量时空变化的系统分析及应用研究[J]. 水利科技, 2015(2): 1-6.
LUO Shoutai, HUANG Zuya. Systematic analysis and application research on spatial-temporal variation of water resource quality in Minjiang River basin. Journal of Hydrology, 2015(2): 1-6. (in Chinese)
- [3] HOLKO, L., PARAJKA, J., KOSTKA, Z., et al. Flashiness of mountain streams in Slovakia and Austria. Journal of Hydrology, 2011, 405(3-4): 392-401. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.038>
- [4] 陆建宇, 王秀庆, 王学斌, 陆宝宏. 径流年内分配不均匀性的度量指标及其应用[J]. 水力发电, 2015, 41(11): 24-28 + 54.
LU Jianyu, WANG Xiuqing, WANG Xuebin, et al. Measurement index of nonuniformity of intra-annual runoff distribution and its application. Water Power, 2015, 41(11): 24-28 + 54. (in Chinese)
- [5] BLACK, A. R., ROWAN, J. S., BRAGG, O. M., et al. Approaching the physical-biological interface in rivers: A review of methods for ecological evaluation of flow regimes. Progress in Physical Geography, 2005, 29(4): 506-531.
<https://doi.org/10.1191/0309133305pp460ra>
- [6] ROBERTSON, D. M., ROERISH, E. D. Influence of various water quality sampling strategies on load estimates for small streams. Water Resources Research, 1999, 35(12): 3747-3759. <https://doi.org/10.1029/1999WR900277>
- [7] WERKHOVEN, K., WAGERNER, T., REED, P., et al. Characterization of watershed model behavior across a hydroclimatic gradient. Water Resources Research, 2008, 44, W01429. <https://doi.org/10.1029/2007WR006271>
- [8] MERZ, R., BLOSCHL, G. A process typology of regional floods. Water Resources Research, 2003, 39(12): 1340-1349.
<https://doi.org/10.1029/2002WR001952>
- [9] BAKER, D. B., RICHARDS, R. P., LOFTUS, T. T., et al. A new flashiness index: Characteristics and applications to midwestern rivers and streams. Journal of the American Water Resources Association, 2004, 40(2): 503-522.
<https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01046.x>
- [10] DEELSTRA, J., IITAL, A. The use of the flashiness index as a possible indicator for nutrient loss prediction in agricultural catchments. Boreal Environment Research, 2008, 13(3): 209-221.
- [11] HUANG, J. C., LIN, C. C., CHAN, S. C., et al. Stream discharge characteristics through urbanization gradient in Danshui River, Taiwan: Perspectives from observation and simulation. Environmental Monitoring & Assessment, 2012, 184(9): 5689-5703.
<https://doi.org/10.1007/s10661-011-2374-2>
- [12] FONGER, D., MANNING, K. and RATHUN, J. Application of the Richards-Baker flashiness index to Gage Michigan River and stream. DEG Michigan's Nonpoint Source Program, 2007: 102.
- [13] 黄金良, 张祯宇, 邵建敏, 等. 九龙江径流 Flashiness 指数时空变化分析[J]. 水文, 2014, 34(3): 37-42.
HUANG Jinliang, ZHANG Zhenyu, SHAO Jianmin, et al. Analysis of spatiotemporal variability of runoff flashiness index for Jiulongjiang River. Journal of China Hydrology, 2014, 34(3): 37-42. (in Chinese)
- [14] 黄博强. 陆海统筹视角下福建省海岸带土地利用变化过程与环境效应研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
HUANG Boqiang. Processes in land use change and their environmental consequences in coastal area of Fujian Province from the perspective of land-sea integration. Xiamen: Xiamen University, 2019. (in Chinese)
- [15] 陈莹, 陈兴伟, 尹义星. 1960-2006 年闽江流域径流演变特征[J]. 自然资源学报, 2011, 26(8): 1401-1411.
CHEN Ying, CHEN Xingwei and YIN Yixing. Characteristics of runoff changes in the Minjiang River basin from 1960 to 2006. Journal of Natural Resources, 2011, 26(8): 1401-1411. (in Chinese)
- [16] 徐在民. 概论福建水资源[J]. 水利科技, 2000(2): 1-6.
XU Zaimin. Introduction to Fujian water resources. Hydraulic Science and Technology, 2000(2): 1-6. (in Chinese)
- [17] 程永隆, 沈恒, 许友勤. 闽江梯级电站对水环境的影响[J]. 水资源保护, 2011, 27(5): 114-118.
CHENG Yonglong, SHEN Heng and XU Youqin. Preliminary study on effects of Min River cascade hydropower stations on water environment. Water Resources Protection, 2011, 27(5): 114-118. (in Chinese)
- [18] FUREY, P. R., GUPTA, V. K. A physically based filter for separating baseflow form streamflow times series. Water Resources Research, 2001, 37(11): 2709-2722. <https://doi.org/10.1029/2001WR000243>
- [19] ZHANG, M. F., WEI, X. H., SUN, P. S., et al. The effect of forest harvesting and climatic variability on runoff in a large wa-

tershed: The case study in the upper Minjiang River of Yangtze River basin. *Journal of Hydrology*, 2012, 25: 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.050>

- [20] 张强, 陈桂亚, 许崇育, 等. 长江流域水沙周期特征及可能影响原因[J]. 水科学进展, 2009, 20(1): 80-85.
ZHANG Qiang, CHEN Guiya, XU Congyu, et al. Periodic characters of sediment load and runoff changes in the Yangtze River basin in the past 40 years, China. *Advances in Water Science*, 2009, 20(1): 80-85. (in Chinese)
- [21] 刘新有, 何大明. 水电开发对河流水沙特性影响的综合评价方法[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 953-960.
LIU Xinyou, HE Daming. A comprehensive assessment method of hydropower development impact on runoff and sediment change. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 953-960. (in Chinese)