

水系连通功能变异下荆南三口流域径流特征

代稳^{1,2}, 张美竹¹, 王金凤¹, 陕振沛¹

(1.六盘水师范学院 旅游与历史文化学院, 贵州 六盘水 553004; 2.六盘水师范学院 乌蒙山发展研究院, 贵州 六盘水 553004)

摘 要:为了探究水系连通功能对流域径流的影响,以荆南三口流域为研究对象,运用模糊综合评判法对水系连通功能进行评判,采用月径流占年径流百分比、年内分配不均匀系数、Morlet小波分析、Sen's slope等方法,定量分析了水系连通功能变异下荆南三口流域径流特征变化。结果表明:(1)荆南三口流域水系连通功能由1956年为Ⅰ级变为1989年为Ⅲ级再到2008年Ⅱ级,2016年保持为Ⅱ级,1989年为水系连通功能变异年,变异前后河道断流率等指标存在差异,变异后大于变异前。(2)水系连通功能变异下荆南三口流域月径流占年径流百分比更加集中在丰水月份,年内分配不均匀系数增加,表明径流年内分配更加不均匀,易造成旱涝灾害。(3)水系连通功能变异下径流序列演变过程存在的周期变化尺度由3~6 a,7~18 a,22~32 a变为3~6 a,7~8 a,9~12 a,13~16 a,第一主周期缩小12~13 a,第二主周期缩小3~4 a,第三主周期缩小1~2 a,径流丰枯震荡次数增加1~4次,表明荆南三口流域径流发生丰枯交替的频率明显。(4)水系连通功能变异下荆南三口流域径流趋势变化发生不同程度的改变,松滋河西支、松滋河东支、虎渡河径流、藕池河西支减少趋势显著,松滋河西支减弱速率较快,松滋河东支、藕池河西支减弱速率减慢,虎渡河径流减弱速率稍增加,藕池河东支无显著变化。

关键词:水系连通功能;模糊综合评判;不均匀系数;Morlet小波分析;荆南三口

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0380-07

Runoff Characteristics in the Three Outlets of Southern Jingjiang River Based on the Variation of Water System Connection Function

DAI Wen^{1,2}, ZHANG Meizhu¹, WANG Jinfeng¹, SHAN Zhenpei¹

(1.School of Tourism and History and Culture, Liupanshui Normal University, Liupanshui, Guizhou 553004, China; 2.Wumengshan Development Institute, Liupanshui Normal University, Liupanshui, Guizhou 553004, China)

Abstract: In order to investigate the influence of the connectivity of the river system on the runoff of the river basin, taking the three Outlets of Southern Jingjiang River Basin as the research object, we used the fuzzy comprehensive assessment method to evaluate the connectivity of the river system, and used the monthly runoff accounted for the annual runoff percentage, the annual uneven distribution coefficient, Morlet wavelet analysis, Sen's slope and other methods to quantitatively analyze the runoff characteristics of the three Outlets of Southern Jingjiang River Basin under the variation of the connectivity of the water system. The results showed that: (1) the connectivity of the water system of the three Outlets of Southern Jingjiang River-watershed changed from Grade I in 1956 to Grade Ⅲ in 1989 to Grade Ⅱ in 2008, remained Grade Ⅱ in 2016, and the year of 1989 was the year of variation in the connectivity of the water system; before and after the variation, there were differences in indicators such as the channel cutoff rate, channel cutoff rate after the variation was greater than before the variation; (2) under the variation of the connectivity function of the river system, the monthly runoff percentage of the annual runoff in the three Outlets of Southern Jingjiang River was more concentrated in the flood months, and the coefficient of uneven distribution during the year increased, indicating that the distribution of runoff during the year was more uneven, which was likely to cause drought and flood disasters; (3) the periodic change scale of the runoff sequence evolution process

收稿日期:2020-03-23

修回日期:2020-04-28

资助项目:国家自然科学基金(41571100);校级科技创新团队(LPSSYKJTD201701)

第一作者:代稳(1982—),男,贵州六盘水人,教授,博士,主要从事水文与水资源、水文生态与环境变化的研究。E-mail:daiwen127822@126.com

under the variation of the connectivity of the water system changed from 3~6 years, 7~18 years, 22~32 years to 3~6 years, 7~8 years, 9~12 years, 13~16 years, and the first main cycle reduced from 12 to 13 years, the second main period reduced by 3 to 4 years, and the third main period reduced by 1 to 2 years; the number of runoff shocks increased by 1 to 4 times, indicating that the frequency of runoff alternation between three Outlets of Southern Jingjiang River watershed was obvious; (4) the runoff trend of the three Outlets of Southern Jingjiang River watershed changed to various degrees under the variation of the connectivity of the river system; runoff of the Songzi River West Branch, the Songzi River East Branch, the Hudu River Runoff, and the Wuchi River West Branch decreased significantly, and the runoff reduction rate of Songzi River West Branch was faster; The runoff reduction rates of the eastern branch of the Songzi River and the western branch of the Muchi River slowed down, and the runoff reduction rate of the runoff of the Hudu River increased slightly, but there was no significant change in the eastern branch of the Muchi River.

Keywords: connecting function of water system; fuzzy comprehensive evaluation; non-uniformity coefficient; Morlet wavelet analysis; the three Outlets of Southern Jingjiang River

科学研究流域径流特征变化一直是水资源科学领域的重点和热点。21 世纪以来,由于气候变化和人类活动加快使径流特征发生明显改变,已开始关注变化环境下径流演变特征^[1]、气候变化下径流特征变化研究^[2]、变异条件下生态径流特征变化分析^[3]。气候变化与人类活动是径流演变的主要驱动因素,其对径流变化贡献率大小,不同河流或相同河流不同区域不同时段是不同的,长江、湄公河和勒拿河等流域气候变化的贡献率大于人类活动,黄河、恒河和印度河等流域气候变化的贡献率小于人类活动^[4],黑河流域上游以气候变化为主,下游以人类活动为主^[5],黄河源区径流量变化受气候变化与人类活动影响的贡献率在 1990—2008 年分别为 33.12%和 66.88%,而在 2009—2015 年则为 73.61%和 26.39%^[6]。反映气候变化的主要指标有降水量、蒸发量、气温等,反映人类活动主要指标有土地利用变化、水利枢纽工程、取用水等,在上述这些指标中对流域径流演变影响的贡献率很难分离。径流是流域内降水流出口断面的水流,天然水道影响着径流演变,水道的连通状况对径流特征有一定改变,水系连通功能反映水流自身的动力及其相对稳定的路径。由此可见,水系连通功能与径流之间密切相关。目前,对水系连通功能的研究主要是水系连通功能评价^[7]、影响因素方面^[8],水系连通功能对径流影响的研究成果至今为止国内外极少报道。

长江荆南三口水系既是连接长江中游的重要纽带,也是沟通长江水与洞庭湖的水流通道。荆南三口水系连通性自 1955—2016 年呈下降趋势^[9],三口径流总体上在 1955—2016 年也呈下降趋势^[10],两者之间是否存在某种特殊的关系? 水系连通功能变异下荆南三口流域径流会发生怎样的变化,有什么特征呢? 因此,本文构建水系连通功能评价指标体系,根

据实测值与给定的评价标准,利用模糊综合评判法计算确定水系连通功能变异年份,开展水系连通功能变异下荆南三口流域径流的变化特征,根据月径流占年径流百分比、年内分配不均匀系数定量评价水系连通功能变异下荆南三口流域径流年内变化特征,遵照 Morlet 小波分析计算得到径流序列演变过程存在的周期变化尺度范围、主周期探究水系连通功能变异下荆南三口流域径流年际周期变化规律,依照 Mann-Kendall 趋势检验法和 Sen's slope 趋势变化强度研讨水系连通功能变异下荆南三口流域径流趋势变化特征。本研究为荆南三口流域径流演变规律、来水预报、防洪,实施河湖水系连通工程,水资源合理配置、生态环境保护以及经济社会发展提供理论依据。

1 研究区概况

荆江是指长江干流枝城站至城陵矶河段的总称,其南岸的松滋、虎渡和藕池三口(调弦口于 1958 年堵口),习惯上称为荆南三口水系,主要分泄长江来水进入洞庭湖(图 1)。由于江湖关系的剧烈演变,三口流域的河流已成为典型的季节性河流。该流域属于亚热带季风气候区,多年平均气温 16.8℃,多年平均降雨量 1 241.2~1 265.6 mm,降雨量在年内、年际间分配不均匀,汛期 4—9 月降雨量为 844.4 mm,占全年降水量的 67.4%以上,多年平均蒸发量为 1 174.5~1 251.0 mm。本文研究范围为荆南三口流域,包括松滋河东支、西支、虎渡河、藕池河东支、西支,并分别采集新江口、沙道观、虎渡河、弥陀寺、管家铺、康家岗等 5 个水文站点 1956—2017 年实测的月径流量作为研究的基础数据,其中 1956—2009 年月流量数据主要来源于长江水利委员会,2010—2017 年主要来源于湖南省水利厅和湖南省水情综合日报表。

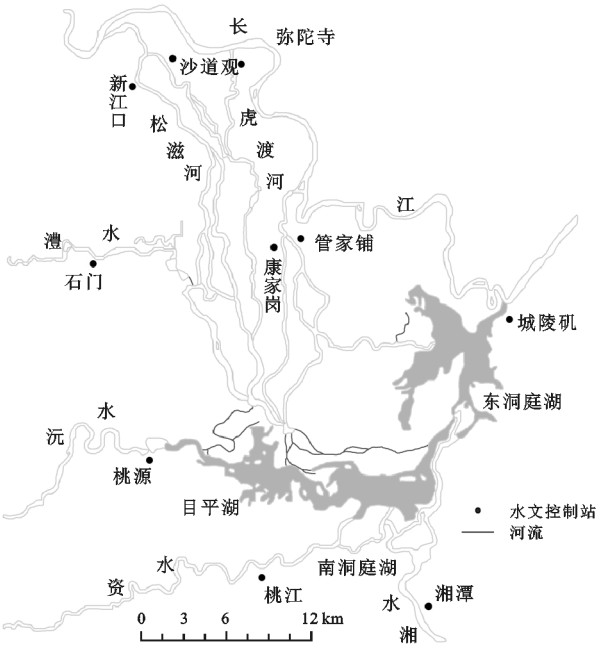


图 1 荆南三口河系主要水文站点分布

2 水系连通功能评价指标及研究方法

2.1 水系连通功能变异点确定方法

2.1.1 水系连通功能评价指标的构建 河网水系连通功能受众多因素影响,是一个比较复杂的、关联性强的水网巨系统。为了定量描述水系连通功能的变化情况,必修构建一套表征水系连通功能评价指标体系。由水系连通功能理论探讨和前人的研究成果可知,对水系连通功能的评价指标体系应涵盖水系连通的自然功能和社会功能等 8 项核心指标(表 1)。

由表 1 可知,河道断流率、地表水农业灌溉供水率、河道通航能力 3 个指标可以反映河湖水系水资源调配功能,生物多样性指标、河流水质达标率、亲水舒适度 3 个指标可以反映河湖水系水质改善功能,湿地

面积变化率、水库调节能力 2 个指标可以反映河湖水系水旱灾害防御功能,无论是资源调配型、水质改善型,还是水旱灾害防御型河湖水系,上述 8 项指标均可以对水系连通功能进行定量评价。

2.1.2 水系连通功能的评价方法 水系连通功能受到水系结构、形态、经济、环境以及社会发展等因素的综合影响,对水系连通功能进行评价必须同时考虑多种因素,仅用一两个简单数值难以进行表示或评价,常常带有模糊性。因此,可以选用模糊综合评价法对水系连通功能进行定量评价。

模糊综合评判是指根据实测值与给定的评价标准,经模糊关系矩阵转换后,对某一具体事件作出定量评价的一种数学方法。模糊综合评判方法其评判步骤^[11]如下:

(1) 构建因子集。由前述水系连通功能分析以及评价指标体系可知,水系连通功能的主要表现形式体现在河道断流率、湿地面积变化率、生物多样性指标、河流水质达标率、地表水农业灌溉供水率、河道通航能力、水库调节能力指数、亲水舒适度等 8 个方面。鉴于此,水系连通功能变异程度的因子集定义为:

$$U=\{u_1,u_2,\cdots,u_8\}$$

(2) 建立评价集。根据《灌溉水利用率测定技术导则》SL/Z699—2015,《城市水系规划导则》SL431—2008,《河湖生态保护与修复规划导则》SL709—2015,旱情等级标准 SL424—2008 以及前人的研究成果,建立水系连通功能评价集:

$$V=v_{ij}=\{v_{i1},v_{i2},v_{i3},v_{i4}\}$$

式中: $v_{i1},v_{i2},v_{i3},v_{i4}$ 分别为不变异、轻度变异、中度变异和重度变异的标准值; i 为 8 个综合评判因子; j 为 4 个评价等级,即评价因子的评价标准分界。

表 1 水系连通功能评价指标体系

目标层	准则层	指标层	子指标层	指标说明
水系连通 功能评价	自然功能	物质能量传递功能	河道断流率	一年中河流断流的天数/一年的总天数
		河流地貌塑造功能	湿地面积变化率	(评价年湿地面积-基准年湿地面积)/基准年湿地面积
		生态维系功能	生物多样性指标	定量指标,有具体计算公式
		水环境净化功能	河流水质达标率	Ⅲ类以上水质的河长/区域内河流的总长
	社会功能	水资源调配功能	地表水农业灌溉供水率	灌溉用水中地表水所占的比例
		水能与水运资源利用功能	河道通航能力	一年中河道能够通航的天数/一年总天数
		洪灾防御功能	水库调节能力指数	水库总库容/多年平均径流量
		景观维护功能	亲水舒适度	根据专家评分获得

(3) 计算评价指标权重,建立权重集。水系连通功能的评价指标权重是指某一指标在整体评价中的相对重要程度。权重是要从若干评价指标中分出轻重来,一组评价指标体系相对应的权重组成了权重体系。权重可以根据各评价因子对总事件的影响大小

赋予相对应的适合权重。模糊综合评判的权重赋权方法可采用超标倍数法,其计算公式^[7]如下:

$$\omega_i=\left[u_i^k / \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_{ij} \right) \right] / \sum_{i=1}^m \left[u_i^k / \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_{ij} \right) \right]$$

式中: $m=8$ 为评价因子的个数; $n=4$ 为水系连通功

能变异的标准等级; u^{ki} 表示第 k 个水文站第 i 个指标实际观测值; v_{ij} 与上述一致。通过计算各评价指标权重,可以组建因子权重集 A :

$$A=(w_1,w_2,\cdots,w_8)$$

(4) 构建隶属函数、求隶属度,建立模糊矩阵。针对水系连通功能变异具有模糊性,将模糊数学中的隶属函数引入到水系连通功能变异评价,采用隶属函数描述水系连通变异对某一等级标准的隶属程度。本文取线性函数作为隶属函数,其数学表达式可以表示为:

$$r_{i1}=\begin{cases} 1 & 0\leq u_i^k\leq v_{i1} \\ \frac{v_{i2}-u_i^k}{v_{i2}-v_{i1}} & v_{i1}<u_i^k<v_{i2} \\ 0 & u_i^k\geq v_{i2} \end{cases}$$
$$r_{i2}=\begin{cases} 1 & u_i^k<v_{i1} \\ \frac{u_i^k-v_{i1}}{v_{i2}-v_{i1}} & v_{i1}\leq u_i^k\leq v_{i2} \\ \frac{v_{i3}-u_i^k}{v_{i3}-v_{i2}} & v_{i2}<u_i^k<v_{i3} \\ 0 & u_i^k\geq v_{i3} \end{cases}$$
$$r_{i3}=\begin{cases} 1 & u_i^k<v_{i2} \\ \frac{u_i^k-v_{i2}}{v_{i3}-v_{i2}} & v_{i2}\leq u_i^k\leq v_{i3} \\ \frac{v_{i4}-u_i^k}{v_{i4}-v_{i3}} & v_{i3}<u_i^k<v_{i4} \\ 0 & u_i^k\geq v_{i4} \end{cases}$$
$$r_{i4}=\begin{cases} 0 & u_i^k\leq v_{i3} \\ \frac{u_i^k-v_{i3}}{v_{i4}-v_{i3}} & v_{i3}<u_i^k<v_{i4} \\ 1 & u_i^k\geq v_{i4} \end{cases}$$

式中: $r_{i1},r_{i2},r_{i3},r_{i4}$ 分别为第 i 个指标特征值对Ⅰ级,Ⅱ级,Ⅲ级,Ⅳ级标准的隶属度; u^{ki} 表示第 k 个水文站第 i 个指标实际观测值; $v_{i1},v_{i2},v_{i3},v_{i4}$ 分别为指标 i 的Ⅰ级,Ⅱ级,Ⅲ级,Ⅳ级的标准值。

将不同时间不同水文站的实测值带入到上述所对应的隶属度函数中,可以计算出其单因子的评价矩阵,则模糊矩阵可以表示为:

$$R=r_{ij}=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{ij} \end{bmatrix}$$

式中: $i=1,2,\cdots,8;j=1,2,3,4$ 。

(5) 求综合评判值。通过上述 4 个步骤可以计算得到模糊矩阵 R 和因子权重集 A ,在结合模糊综合评判计算要求,可以得到模糊综合评价的结果:

$$B=A\times R=(w_1,w_2,\cdots,w_8)\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{81} & r_{82} & \cdots & r_{84} \end{bmatrix}=(b_1,b_2,b_3,b_4)$$

最后根据最大隶属度原则,计算出模糊综合评判值即为水系连通功能变异结果。

2.2 径流年内变化规律研究方法

径流年内分配不均匀性主要采用月径流占年径流百分比和年内分配不均匀系数 $C_v^{[12]}$ 来表征。

$$C_v=\sigma/\bar{R}$$

$$\sigma=\sqrt{\sum_{i=1}^n(R-\bar{R})^2}$$

$$\bar{R}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nR_i\quad(i=1,2,\cdots,12)$$

式中: R 为年内月水资源量实测值; \bar{R} 为年内水资源量的平均值。

2.3 周期变化的研究方法

识别水文时间系列周期变化的研究方法常用 Morlet 小波分析法,该方法的基本原理^[13]如下:

$$\Psi(t)=\exp(iw_0t)\exp(-t^2/2)$$

$$\Psi_{a,b}(t)=|a|-1/2\Psi(\frac{t-a}{a})\quad a,b\in R,a\neq 0$$

$$W_f(a,b)=|a|-1/2\Delta t\sum_{k=1}^Nf(k\Delta t)\overline{\Psi}(\frac{k\Delta t-b}{a})$$

$$\text{var}(a)=\int+\infty-\infty|W_f(a,b)|^2db$$

式中: $\Psi(t),\Psi_{a,b}(t)$ 分别为基小波函数、子小波函数; $W_f(a,b)$ 为小波变换系数; $\text{var}(a)$ 为小波方差; $\Psi(t)$ 为 $\Psi(t)$ 的复共轭; a,b,t 为连续变量,分别为尺度收缩因子(表示小波在尺度上周期长度)、时间平移因子(表示小波在时间上的平移距离)和时间; Δt 为取样时间间隔; N 为样本容量。

2.4 年际趋势变化的研究方法

年际趋势变化主要采用 Mann-Kendall 趋势检验法^[13-15],趋势变化强度采用了 Sen's slope 法,MK 趋势变化方法,在许多文献中均有介绍和说明,在此不作赘述。

3 结果与分析

3.1 水系连通功能变化

运用超标倍数法计算出水系连通功能评价指标的权重,首先确定水系连通功能评价标准值(表 2),然后利用荆南三口水系连通功能评价指标体系中 8 个指标实际值,计算出河道断流率、湿地面积变化率、生物多样性指标、河流水质达标率、地表水农业灌溉供水率、河道通航能力、水库调节能力指数、亲水舒适度的权重分别为 0.17,0.09,0.12,0.13,0.16,0.12,

0.11,0.1。自然功能和社会功能的权重为 0.51,0.49。从 8 个指标的权重可以看出,河道断流率最高,意味着河道断流率对水系连通功能影响最大。

表 2 水系连通功能评价标准

指标层	I 级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级
河道断流率	15	35	65	90
湿地面积变化率	10	5	0	−10
生物多样性指标	0.9	0.8	0.7	0.5
河流水质达标率	90	65	45	25
地表水农业灌溉供水率	80	60	40	20
河道通航能力	90	70	50	20
水库调节能力指数	0.95	0.85	0.75	0.6
亲水舒适度	95	85	75	65

根据以上公式计算荆江三口地区水系连通功能隶属度,构建出该地区 1956 年、1989 年、2008 年、2016 年的评判矩阵 R 如下:

$R_{1956}=r_{ij}=\begin{bmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.90 & 0.10 & 0.00 \\ 0.12 & 0.88 & 0.00 & 0.00 \\ 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.05 & 0.95 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.80 & 0.20 \\ 0.90 & 0.10 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$

$R_{1989}=r_{ij}=\begin{bmatrix} 0.00 & 0.10 & 0.90 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.35 & 0.65 \\ 0.80 & 0.20 & 0.00 & 0.00 \\ 0.75 & 0.25 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.40 & 0.60 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.20 & 0.80 \end{bmatrix}$

$R_{2008}=r_{ij}=\begin{bmatrix} 0.00 & 0.40 & 0.60 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.50 & 0.50 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.85 & 0.15 & 0.00 \\ 0.00 & 0.40 & 0.60 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}$

$R_{2016}=r_{ij}=\begin{bmatrix} 0.00 & 0.47 & 0.53 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.60 & 0.40 \\ 0.00 & 0.10 & 0.90 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.95 & 0.05 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.70 & 0.30 \end{bmatrix}$

根据模糊综合评判复合运算方法及最大隶属度原则,即取大取小法复合运算,则荆江三口地区 4 个年份水系连通功能综合评价值为:

$B_{1956}=AR_{1956}=[0.4416 \quad 0.3464 \quad 0.1000 \quad 0.1120]$

$B_{1989}=AR_{1989}=[0.2240 \quad 0.1310 \quad 0.3970 \quad 0.2480]$

$B_{2008}=AR_{2008}=[0.0000 \quad 0.5040 \quad 0.2460 \quad 0.2500]$

$B_{2016}=AR_{2016}=[0.0000 \quad 0.4763 \quad 0.3557 \quad 0.1680]$

按照上述计算步骤,计算出研究区水系连通自然功能和社会功能评价等级,评级结果见图 2。从图 2 中可以看出,1956—1989 年荆南三口自然功能、社会功能和综合功能的变化趋势是一致的,呈现下降趋势,自然功能、社会功能由Ⅱ级降至Ⅲ级,综合功能由Ⅰ级降至Ⅲ级;2008—2016 年自然功能、社会功能和综合功能基本保持Ⅱ级。从水系连通功能的指标来看,河道断流率呈显著上升趋势,湿地面积变化率、河道通航能力、亲水舒适度、地表水农业灌溉供水率呈下降趋势,生物多样性指标在 0.6 附近,呈弱下降趋势,水库调节能力指数呈上升趋势。指标权重和指标变化趋势表明,河道断流率增加,地表水农业灌溉供水率降低必然引起流域径流特征变化。

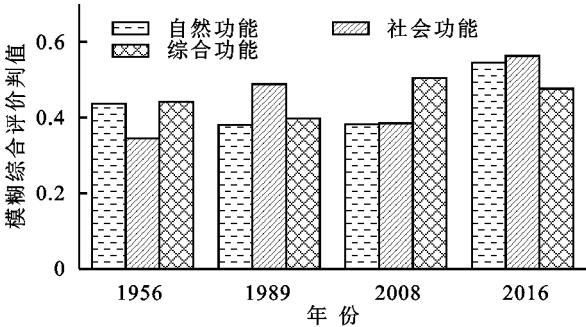


图 2 荆南三口水系连通功能评价结果

由上述分析可知,荆南三口水系连通功能 1956 年为Ⅰ级,1989 年为Ⅲ级,2008 年、2016 年均为Ⅱ级,4 个典型评价年份中 1989 年水系连通功能变化较大。因此,荆江三口流域水系连通功能变异的年份为 1989 年、1956—1989 年为水系连通功能基础期,1990—2017 为变异期。

3.2 径流年内变化分析

通过计算荆南三口流域水系连通功能变异前后月径流占年径流百分比和年内分配不均匀系数 C_v 来反映水系连通功能变异下径流年内变化特征。由图 3 可知,荆南三口流域月径流占年径流百分比呈现“单峰型”,水系连通功能变异后峰值高于变异前,跨度小于变异前,这意味着水系连通功能变异后径流更加集中在 6 月、7 月、8 月份,冬季径流所占比更重更少,甚至有些流域出现断流,如松滋河东支、虎渡河,说明水系连通功能变异后荆南三口流域年内分配更加不

均匀。由图 4 可知,荆南三口五站变异后年内分配不均匀系数均大于变异前,沙道观、弥陀寺尤为突出,进一步说明变异后荆南三口流域年内分配极不均匀,意味着水系连通功能变异后荆南三口流域径流年内分配差距较大,夏季径流更丰富,枯水季节更稀少,表明径流年内变化程度激烈,容易造成旱涝灾害。

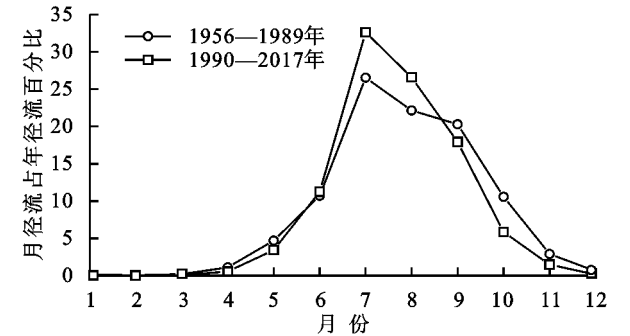


图 3 荆南三口流域月径流占年径流百分比

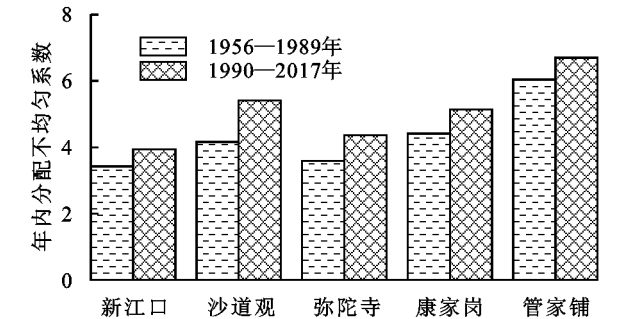


图 4 荆南三口流域年内分配不均匀系数

3.3 径流年际周期变化分析

根据 Morlet 小波变换公式,计算出水系连通功能变异前后荆南三口流域不同时间尺度域下小波系数和小波方差,观察小波系数实部等值线图和小波方差变化图,得出荆南三口流域径流年际周期变化规律。

由表 3 可知,水系连通功能变异下荆南三口流域由 3 类尺度周期增加为 4 类尺度周期,在不同的时间尺度上,径流丰枯震荡次数增加,周期中心和主周期时间均有缩短。就松滋河西支而言,水系连通功能变异下其径流变化过程由 3~6 a,7~18 a,22~32 a,3 类尺度的周期变化变为在 3~6 a,7~8 a,9~12 a,13~16 a 4 类尺度的周期变化,周期中心由 5 a,10 a,28 a 变为 4 a,7 a,9 a,15 a,振荡次数从较大尺度 22~32 a 的准 2 次、中尺度 7~18 a 准 4 次、较小时间尺度 3~6 a 在 5 a 附近存在丰枯交替变化规律变为较大尺度 13~16 a 的 3 次、9~12 a 的 4 次、7~8 a 时间尺度上的准 5 次、较小时间尺度 3~6 a 上在周期中心 4 a 附近的准 9 次振荡,主周期从 5 a,10 a,28 a 减小为 4 a,7 a,15 a。因此,水系连通功能变异下荆南三口流域径流年际发生丰枯交替变化更加容易,年内发生丰枯交替的频率增加,说明荆南三口流域径流出现旱涝的概率上升,意味着水系连通功能作用发挥存在困难必将影响径流量的时空分布不均且容易造成极端化。

表 3 水系连通功能变异前后荆南三口流域周期变化				a
河流	周期变化要素	1956—1989 年	1990—2017 年	
松滋河西支	尺度范围	3~6,7~18,22~32	3~6,7~8,9~12,13~16	
	周期中心	5,15,28	4,7,9,15	
	主周期	5,10,28	4,7,15	
松滋河东支	尺度范围	3~6,7~18,22~32	3~6,7~8,9~12,13~16	
	周期中心	5,14,28	7,15	
	主周期	5,11,27	4,7,15	
虎渡河	尺度范围	3~6,7~18,22~32	3~6,7~8,9~12,13~16	
	周期中心	10,28	7,15	
	主周期	5,10,28	4,7,15	
藕池河西支	尺度范围	3~6,7~18,22~32	3~6,7~8,9~12,13~16	
	周期中心	5,14,26	3,8,13	
	主周期	5,14,26	3,8,13	
藕池河东支	尺度范围	3~6,7~18,22~32	3~6,7~8,9~12,13~16	
	周期中心	14,26	7,14	
	主周期	5,10,27	3,7,14	

3.4 径流年际趋势变化分析

运用 Mann-Kendall 检验法判断趋势变化,根据 Sen's slope 法的公式计算斜率估计值,通过分析得到荆南三口流域径流年际变化趋势检验结果(表 4)。

由表 3 可知,水系连通功能变异下松滋河西支径流由无显著增加趋势变为显著减少趋势($\alpha=0.05$),且减少程度较高;变异前后松滋河东支径流均呈显著减少趋势($\alpha=0.01$),变异下减少程度减弱;变异前后虎渡河径流均呈显著减少趋势($\alpha=0.01$),变异下减

少程度稍增加;变异前后藕池河西支径流均呈显著减少趋势,变异下置信水平从 99%降至 90%,减少程度弱;变异前藕池河东支呈显著减少趋势($\alpha=0.01$),减少程度强,变异下径流由无变化趋势。由此可见,水系连通功能变异下荆南三口流域径流年际趋势变化存在不同程度的影响,松滋河西支径流减少趋势显著,减弱速率较快,松滋河东支径流减少趋势显著,减弱速率减慢,虎渡河径流减少趋势显著,减弱速率与变异前稍增加,藕池河西支径流减少趋势较显著,减弱速率较慢,藕池河东支无显著变化。在全球气候变化和人类活动的双重作用下,荆南三口流域水系连通功能强弱受其影响,河道断流率增加、地表水农业灌溉供水率降低、河道通航能力减弱、水库调节能力指数减小、亲水舒适度降低等,势必导致径流减少。

河流	1956—1989 年			1990—2017 年		
	Z	α	β	Z	α	β
松滋河西支	0.3854		0.3333	-2.4103	0.05	-4.0145
松滋河东支	-4.6993	0.01	-2.8889	-3.0623	0.01	-1.847
虎渡河	-4.0767	0.01	-2.64	-3.6154	0.01	-2.9628
藕池河西支	-4.388	0.01	-1.4145	-1.6793	0.1	-0.1477
藕池河东支	-5.0996	0.01	-14.6385	0		0.07

4 结 论

(1) 1956—2016 年荆南三口自然功能、社会功能和综合功能的变化呈先下降后增加趋势,河道断流率、地表水农业灌溉供水率等指标揭示水系连通功能与径流特征之间存在一定关系。

(2) 荆江三口流域水系连通功能变异的年份为 1989 年、1956—1989 年为水系连通功能基础期,1990—2017 年为变异期。

(3) 水系连通功能变异后荆南三口流域径流月径流占年径流百分比更加集中在 6 月、7 月、8 月份,年内分配不均匀系数增大,径流年内分配极不均匀,夏季径流更丰富,枯水季节更稀少。

(4) 水系连通功能变异下荆南三口流域由 3 类尺度周期增加为 4 类尺度周期,在不同的时间尺度上,径流丰枯震荡次数增加,周期中心和主周期时间均有缩短,水系连通功能变异下荆南三口流域径流年际发生丰枯交替变化更加容易,年内发生丰枯交替的频率增加。

(5) 水系连通功能变异下松滋河西支、松滋河东支、虎渡河径流、藕池河西支减少趋势显著,达到

95%,99%,99%和 90%置信水平,松滋河西支减弱速率较快,松滋河东支、藕池河西支减弱速率减慢,虎渡河径流减弱速率稍增加,藕池河东支无显著变化。水系连通功能变异致使荆南三口流域径流趋势变化发生不同程度的改变。

参考文献:

[1] 代稳,吕殿青,李景保,等.气候变化和人类活动对长江中游径流量变化影响分析[J].冰川冻土,2016,38(2):488-497.

[2] 王艳,乔长录,张和平.气候变化下奎屯河流域径流特征分析[J].水利水电技术,2020,51(2):60-68.

[3] 温庆志,姚蕊,孙鹏,等.变异条件下淮河流域生态径流变化特征及驱动因子[J].生态学报,2020,40(8):2621-2635.

[4] Jain S K, Agarwal P K, Singh V P. Hydrology and Water Resources of India [M]. Berlin: Springer Netherlands, 2007.

[5] 何旭强,张勃,孙力炜,等.气候变化和人类活动对黑河上中游径流量变化的贡献率[J].生态学杂志,2012,31(11):2884-2890.

[6] 李万志,刘玮,张调风,等.气候和人类活动对黄河源区径流量变化的贡献率研究[J].冰川冻土,2018,40(5):985-992.

[7] 靳梦,窦明.城市化对水系连通功能影响评价研究:以郑州市为例[J].中国农村水利水电,2013(12):41-44.

[8] 李景保,何蒙,吕殿青,等.水利工程对长江荆南三口水系连通功能变化的影响[J].热带地理,2019,39(1):135-143.

[9] 李景保,于丹丹,张瑞,等.近 61 年来长江荆南三口水系连通性演变特征[J].长江流域资源与环境,2019,28(5):1214-1224.

[10] 李景保,吴文嘉,徐志,等.长江中游荆南三口河系径流演变特征及趋势预测[J].长江流域资源与环境,2017,26(9):1456-1465.

[11] 段新光,栾芳芳.基于模糊综合评判的新疆水资源承载力评价[J].中国人口·资源与环境,2014,24(S1):119-122.

[12] 管华.水文学[M].北京:科学出版社,2015:151-156.

[13] Bradshaw G A, McIntosh B A. Detecting climate-induced patterns using wavelet analysis[J]. Environmental Pollution, 1994,83(1/2):135-142.

[14] Burn D H, Hag Elnur M A. Detection of hydrologic trends and variability[J]. Journal of Hydrology, 2002, 255(1/4):107-122.

[15] Machiwal D, Jha M K. Comparative evaluation of statistical tests for time series analysis: Application to hydrological time series [J]. Hydrological Sciences Journal-Journal Des Scien-Ces Hydrologiques, 2008,53(2):353-366.