

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.06.017

荆南三口流域水系连通性变化对 水资源开发利用的影响

代 稳^{1,2}, 王金凤¹, 陕振沛¹, 张美竹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区发展研究院, 贵州 六盘水 553004)

摘要:为了探讨水系连通性对荆南三口流域水资源开发利用的影响,采用 Mann-Kendall 趋势检验法分析 1965—2017 年长江荆南三口河系水位演变情势和径流量变化特征,重点剖析了水系连通性对三口地区水资源量、水文干旱、不同河系水资源开发利用的影响。结果表明:荆南三口流域特征水位变化趋势显著,年平均水位降低,不利于水资源开发;荆南三口流域多年平均径流量变化幅度大,水资源开发利用难度增大;荆南三口流域水文干旱次数呈增长趋势,干旱历时增长,水资源短缺问题严峻;荆南三口流域年径流量地区分配不均衡,年际相差大,对流域内水资源开发利用极为不利。

关键词:水系连通性;水文情势;水资源开发利用;水文干旱;Mann-Kendall 趋势检验法;荆南三口流域

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2021)06-0114-07

Influence of water system connectivity variation on water resources development and utilization in the Three Outlets Basin of Southern Jingjiang River // DAI Wen^{1,2}, WANG Jinfeng¹, SHAN Zhenpei¹, ZHANG Meizhu¹
(1. School of Tourism and History and Culture, Liupanshui Normal University, Liupanshui 553004, China; 2. Wumengshan Development Institute, Liupanshui Normal University, Liupanshui 553004, China)

Abstract: In order to explore the influence of the water system connectivity on the development and utilization of water resources in the Three Outlets Basin of Southern Jingjiang River, the evolution of water level and the variation characteristics of runoff in the years of 1965—2017 were analyzed by the method of Mann-Kendall trend test. This paper focuses on the analysis of the influence of the water system connectivity on the water resources quantity, hydrological drought and the development and utilization of different river systems in the Three Outlets Basin of Southern Jingjiang River. The results show that: The characteristic water levels of the Three Outlets Basin of Southern Jingjiang River changed significantly. and the average annual water level has decreased, which is not conducive to the development of water resources. The variation range of average annual runoff of the Three Outlets Basin of Southern Jingjiang River is large, and the development and utilization of water resources are more difficult. The number of hydrological droughts in the Three Outlets Basin of Southern Jingjiang River system showed an increasing trend, and the drought duration is increasing. The problem of water shortage is severe. The regional distribution of annual runoff in the Three Outlets Basin of Southern Jingjiang River is not balanced and the annual variation is large, which is very disadvantageous to the development and utilization of water resources in the basin.

Key words: water system connectivity; hydrological situation; development and utilization of water resources; hydrological drought; Mann-Kendall trend test method; the Three Outlets Basin of Southern Jingjiang River

水资源承载的载体是河湖水系,河湖水系连通状况与径流的变化和水资源量相互作用,密切相

关^[1]。近年来,由于气候变化和人类活动的双重压力,流域水系连通状况受到深远的影响^[2-5],尤其城

市化对水系连通变化产生较大影响^[6-12]。水系连通发生变化必然引起径流特征变化,进而影响水资源开发利用,但目前关于水系连通状况与水资源开发利用规律的研究成果还很少。

长江荆南三口水系既是连接长江中游的重要纽带,也是沟通长江与洞庭湖的通道。已有研究表明,长江荆南三口水系 2016 年水系连通性、水系连通环度、节点连接率、水文连通性、水系连通度均在 1955 年的基础上有所减小,以节点连接率下降尤为突出^[13]。环境变化下荆南三口水系年径流量呈下降趋势,整体干旱频率偏高且干旱事件发生的次数增多^[14],干旱历时增长,干旱强度增大,峰值增高^[1],水系连通功能基本呈下降趋势^[15]。为揭示荆南三口水系连通性的变化与该地区水资源开发利用之间的关系,本文运用 Mann-Kendall 趋势检验法^[16]和 Sen's slope 趋势变化强度分析水系连通性变异后荆南三口流域水位演变情势,利用算术平均法、最大值函数、最小值函数、离差系数、年际极值比、不均匀系数等识别水系连通性变异后荆南三口年径流量变化情况,并从水资源量、水文干旱、水资源开发利用角度探讨了水系连通性变异对荆南三口流域水资源开发利用的影响,以期为荆南三口流域探求径流演变规律、来水预报、防洪及实施河湖水系连通工程等提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

荆江是指长江干流枝城站(湖北省宜都市)至城陵矶河段(湖南省岳阳市)的总称,全长约为 360 km,分为上荆江和下荆江,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,主要分泄长江水沙补给洞庭湖(图 1)。荆南三口流域总面积约为 4 150 km²,主要河流有松滋河东支、松滋河西支、虎渡河、藕池河东支、藕池河西支,可划分 5 个等级,2016 年 5 等级河流 4 条、4 等级 12 条、3 等级 16 条、2 等级 30 条、1 等级 70 条。近年来,由于受气候变化和以水利工程为主的人类活动的影响,荆南三口流域水系结构连通性、水系水力连通性发生各种变化^[17],从而导致该水系水文情势日趋复杂,造成荆南三口流域出现水资源短缺问题。

1.2 数据来源

将新江口、沙道观、弥陀寺、管家铺、康家岗 5 个水文站点(图 1)1956—2017 年实测的月径流量、水位作为研究的基础数据。1956—2009 年月径流量、水位数据主要来自长江水利委员会,2010—2017 年

相关数据主要来自湖南省水利厅和湖南省水情综合日报表;使用已有统计多年平均断流天数推算变异前后多年平均断流天数;湿地面积的数据来源于遥感影像数据的处理、解译、分类和提取;生物多样性指标原始数据取自湖南省洞庭湖环境保护监测站、洞庭湖生态环境监测中心以及相关的研究^[18-20];地表水农业灌溉供水、河流水质监测数据取自洞庭湖四口河系防洪、水资源与水环境研究报告及湖南省水资源公报;一年中河道能够通航的天数数据来源于湖南省水运管理局以及设计水位推算;水库库容数据来源于《湖南省洞庭湖区防洪治涝工作手册》。



图 1 荆南三口流域水系
Fig.1 Water system in the Three Outlets
Basin of Southern Jingjiang River

2 研究方法

2.1 模糊综合评价法

模糊综合评价法根据模糊数学的隶属度理论把对受到多种因素制约的水系连通性评价转化为定量评价,通过构建模糊综合评价指标体系、权重向量、隶属矩阵来完成对水系连通性评价。

2.2 保证率划分丰平枯典型年的方法

为便于揭示水系连通性变异对荆南三口流域水资源开发利用的影响程度,通过计算荆南三口流域 5 个水文站 1956—1989 年和 1990—2017 年径流序列的经验频率,先进行排频计算,利用皮尔逊Ⅲ型曲线进行配线,得到各频率情况下所对应的径流量值,再分别取水系连通性变异前后 $P = 25\%$ 、 50% 、 75% 所对应的径流量值作为丰、平、枯水年的设计值,然后选取与设计值相等或接近的年份作为相应的丰平

枯代表年。

2.3 游程理论

采用游程理论进行水文干旱的确定,即将流量小于某一阈值(通常以各月径流量分位数,如 25 分位数)时来划分水文干旱,水文干旱特征包含水文干旱历时(干旱从开始到结束所持续的时间)、水文干旱强度(在干旱时期内径流的缺水总量)和水文干旱峰值(在干旱时期内河流的最小流量,反映最大缺水量)3 个参数^[1]。

3 水系连通性变异后荆南三口水文情势演变特征

3.1 水系连通性变异点的确定

运用模糊综合评价法计算河道断流率、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 8 个指标(图 2)最大隶属度值,通过取大取小法复合运算,判别出荆南三口流域水系连通性 1956 年为 I 级,1989 年为 III 级,2008 年和 2016 年均均为 II 级,4 个典型评价年份中 1989 年水系连通性变化较大。从河流自然属性、社会属性的角度(河网中河段的长度、河段的重要程度、过水能力、过水能力指数、河网中河段的平均宽度构建水系连通性函数)评价水系连通度,荆南三口流域河系水系连通度在 0.018 2~0.014 5 之间波动,由于荆南三口诸河河长、河宽缩短变窄,过水能力减弱,1989 年的水系连通度为最小值,表明荆南三口水系连通性在 1989 年前后发生了突变^[1,21]。

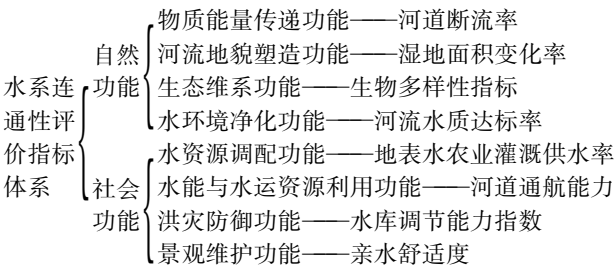


图 2 水系连通性评价指标体系

Fig. 2 Evaluation index system of water system connectivity

对比水系连通性评价标准(表 1),从水系连通自然功能和社会功能评价结果可以看出,1989 年研究区自然功能、综合功能评价值先降低后上升,社会功能评价值先上升后降低(表 2)。

综上,为了有效分析水系连通性变异后荆南三口流域水位、流量演变规律及其对水资源开发利用的影响机理,本文以水系连通性变异时间(1989 年)为节点,将 1956—2017 年时间序列划分为两个时段:1956—1989 年(基准期),1990—2017 年(变异期)。

表 1 水系连通性评价标准

Table 1 Evaluation criteria for water system connectivity

指标等级	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/%
不变异	[0,15)	[10,5)	[1.0,0.8)	[100,65)
轻度变异	[15,35)	[5,0)	[0.8,0.7)	[65,45)
中度变异	[35,65)	[0,-10)	[0.7,0.5)	[45,25)
重度变异	[65,100]	[-10,-20]	[0.5,0]	[25,0]

指标等级	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
不变异	[100,60)	[1,0.7)	[1,0.85)	[100,85)
轻度变异	[60,40)	[0.7,0.5)	[0.85,0.75)	[85,75)
中度变异	[40,20)	[0.5,0.2)	[0.75,0.6)	[75,65)
重度变异	[20,0]	[0.2,0]	[0.6,0]	[65,0]

表 2 荆南三口流域水系连通性评价结果

Table 2 Evaluation results of water system connectivity in the Three Outlets Basin of Southern Jingjiang River

年份	自然功能	社会功能	综合功能
1956	0.436	0.345	0.442
1989	0.381	0.488	0.397
2008	0.382	0.385	0.504
2016	0.545	0.563	0.476

3.2 水位演变情势

采用 Mann-Kendall 趋势检验法^[16]计算出水系连通性变异前后荆南三口流域年平均水位、年最高水位、年最低水位 Mann-Kendall 统计量 Z 值、趋势大小的倾斜度 β 值,结果如表 3 所示。由表 3 可知,水系连通性变异前后荆南三口年平均水位统计量 Z 值均为负,意味着年平均水位总体呈下降变化趋势,但此变化趋势不显著;年最高水位由不显著下降趋势变为显著下降趋势,下降速率由每 10 a 0.13 m 增至 0.61 m;年最低水位由不显著下降趋势变为显著上升趋势。由此可见,水系连通性变异后荆南三口流域年平均水位演变情势与基准期相似,变化不大,年最高水位下降趋势显著且下降快,年最低水位变化趋势显著。由此认为,水系连通性变异后荆南三口流域特征水位变化趋势显著,年平均水位降低,年最高水位、年最低水位年际相差增大,易造成旱涝灾

表 3 水系连通性变异后荆南三口流域特征水位

Man-Kendall 趋势变化

Table 3 Man-Kendall trend changes of characteristic water levels in the Three Outlets Basin of Southern Jingjiang River after the water system connectivity changes

时段	特征水位	统计 Z	倾斜	趋势值
1956—1989	年平均水位	-1.334 2	-0.020 5	
	年最高水位	-0.978 4	-0.013	
	年最低水位	-0.415 1	-0.009	
1990—2017	年平均水位	-1.679 3	-0.017 4	
	年最高水位	-2.074 4	-0.061 4	0.05
	年最低水位	3.220 3	0.236 5	0.01

害,对水资源开发利用产生消极影响。

3.3 径流量变化特征

为了识别水系连通性变异后荆南三口流域年径流量情势变化,利用算术平均法、最大值函数、最小值函数、离差系数、年际极值比、不均匀系数计算研究区径流变化特征值。结果表明:水系连通性变异后三口流域多年平均径流量 540.20 亿 m^3 ,比变异前 1004.65 亿 m^3 少 464.45 亿 m^3 ,年径流量最大值少 693.03 亿 m^3 ,最小值少 362.48 亿 m^3 ,这意味着水系连通性变异后荆南三口流域年径流量较少,不利于水资源开发利用;变异前研究区年径流量离差系数、年际极值比、不均匀系数分别为 0.3081、3.18 和 1.05,变异后分别为 0.3075、5.71 和 1.22,说明水系连通性变异后年径流量年际变化幅度大,年内分配不均匀,意味着径流量不稳定,易形成洪涝灾害,对水资源开发利用产生不利影响。由此可见,水系连通性变异后荆南三口流域年径流量较小,变化幅度大且年内分配不均匀,水资源开发利用难度增大。

4 水系连通性变异对水资源开发利用的影响

4.1 对水资源量的影响

水系连通是河湖水系上保持流动水流和脉络相通的通道,该通道在一定程度上反映河湖水系连通状况和水流的连续性,其水系连通程度对水资源多寡具有一定的指示作用。鉴于此,根据 1956—2017 年荆南三口流域四站(新江口无断流)断流天数与水系连通度数据,计算出断流天数与水系连通度的 Pearson 相关系数为 0.78,这表明,水系连通度与水资源量关系密切,即荆南三口流域水资源变化受水系连通程度的影响。由河流数量、河长、河网密度、水面率、支流发育系数、河网复杂度、水系分维数与水资源的相关系数可知,表征水系连通状况的 7 个水系结构参数在一定程度上对水资源量产生极其重要的影响。

通过计算水系连通性变异前后径流序列的经验频率,选取 1966 年、1959 年、1972 年分别代表变异前的丰水年、平水年和枯水年,1996 年、2008 年、1994 年分别代表变异后的丰水年、平水年和枯水年。将水系连通性变异前后荆南三口流域典型年月径流量和年径流量作对比分析,结果表明,水系连通性变异后,荆南三口流域丰水年、平水年、枯水年年径流量分别减少 522.06 亿 m^3 、416.26 亿 m^3 和 251.20 亿 m^3 ,这意味着研究区典型年水资源量减少同等数量,其原因除了与荆南三口流域同期降雨偏

少密切相关外,与河流数量减少、河道长度缩短、河网密度减小、水面率降低等存在很大关系。从典型年月径流量来分析,水系连通性变异后,荆南三口流域丰水年 7 月月径流量增加 7.28 亿 m^3 ,其余月份月经流量均为减少,其中 9 月减少了 258.46 亿 m^3 ,月经流量小于 1 亿 m^3 的月份由 1 个增至 4 个,且最小值由 0.81 亿 m^3 (3 月)减至 0.07 亿 m^3 (1 月);平水年 9 月、11 月月径流量增加,其余月份为减少,其中 3 月、4 月、5 月、6 月、7 月、8 月、10 月月径流量降幅达到 10 亿 m^3 以上,甚至有的月份超过 100 亿 m^3 ,1—3 月月径流量均小于 0.5 亿 m^3 ;枯水年 2 月、10 月、12 月月径流量增加,其余 9 个月份为减少,月经流量最大值均未超过 100 亿 m^3 ,1—3 月月径流量均小于 0.15 亿 m^3 ,4 月、5 月、11 月、12 月月径流量在 3.9 亿~8.9 亿 m^3 。由此认为,水系连通性变异后荆南三口流域年径流量呈下降趋势,不同典型年减少程度不同,枯水年年内水资源调配次数多(3 次增加),月水资源量偏少,平水年次之(2 次增加),月水资源量较变异前降幅大,丰水年一般(1 次增加),月水资源量年内变化幅度大。从水资源开发利用的角度上讲,水系连通性变异后荆南三口流域水资源开发利用难度增大。

4.2 对水文干旱的影响

水文干旱是指河川径流低于其正常值的现象,表征可利用水量在特定面积、特定时段内的短缺。如果在一段时期内,流量持续低于某一特定的阈值,则认为发生了水文干旱,水文干旱的发生对水资源开发利用带来严重的冲击。运用游程理论定量识别出荆南三口河系水文干旱特征变量为干旱历时、干旱强度和峰值。对比分析水系连通性变异前后水文干旱特征变量,结果表明,水系连通性变异后荆南三口河系水文干旱次数呈增长趋势^[1],不同河系的增长幅度不同,松滋河东支水文干旱次数由 34 年 62 次增至 28 年 134 次,松滋河西支由 71 次增至 220 次,虎渡河由 76 次增至 201 次,藕池河东支由 233 次增至 239 次,藕池河西支由 107 次增至 215 次;水文干旱历时增长,较高干旱历时频次增大,平均干旱历时增大,以藕池河东支康家岗为例,干旱历时最大值从 13 个月增至 19 个月,9 个月干旱历时频次增多,10 个月、15 个月干旱历时开始出现,干旱历时平均值从 6 个月增至 7 个月;水文干旱强度和峰值增加,最大值、平均值和中位数均呈上升趋势。由此可见,水系连通性变异后荆南三口河系水文干旱次数增多,干旱历时增长,较高干旱历时频次和平均干旱历时增大,干旱强度和峰值增大,这意味着出现干旱事件的频次概率增大,时间增长,缺水量增多,水资

源短缺问题严峻,对水资源开发利用造成负面影响。

4.3 对水资源开发利用的影响

随着水系连通性在 20 世纪 90 年代发生明显变异,荆南三口松滋河东支、松滋河西支、虎渡河、藕池河东支、藕池河西支平均径流量比变异前有着不同程度的减少,这势必对水资源开发利用造成一定影响。鉴于此,为定量识别水系连通性对荆南三口流域不同河系水资源开发利用的影响,本文从水系连通性变异前后不同河系径流量变化趋势、断流天数变化过程视角做进一步探讨。

由图 3 可知,水系连通性变异后荆南三口流域五河系径流量呈不均匀下降趋势,各河系多年平均径流量大小顺序的位置除藕池河西支有影响外,其余保持不变,从大到小依次为松滋河东支、藕池河西支、虎渡河、松滋河西支、藕池河东支,说明水系连通

性变异对三口流域五河系径流量影响具有同向性,无选择性影响。根据各水文站径流量变化过程线可知,水系连通性变异后,松滋河东支年径流量由在 300 亿 m^3 上下波动变为呈递减变化趋势,年径流量最低值为 84.12 亿 m^3 ;松滋河西支年径流量递减率比变异前降低,但在变异前的基础上持续递减,其径流量最低值仅为 4.42 亿 m^3 ;虎渡河年径流量变异后在变异前的基础上下降率持续递减,年际变幅较大,最大年径流量达到 180 亿 m^3 ,最小值只有十几亿 m^3 ;藕池河东支年径流量本身就只有 50 亿 m^3 ,变异后在变异前的基础上下降率持续递减,使得有的年份年径流量低于 0.5 亿 m^3 ;藕池河西支由递减变化趋势变为弱增加趋势,但总体还是低于变异前,年径流量高于藕池河西支、虎渡河、松滋河东支,低于松滋河西支。水系连通性变异后三口流域五河系年径流量地区分配不均衡,年际相差大,对三口流域内水资源开发利用极为不利。主要表现在:一是枯水年可开发利用的水资源减少,且河系之间差异较大,松滋河东支 1994 年径流量 168.1 亿 m^3 ,松滋河西支 29.44 亿 m^3 ,虎渡河 76.45 亿 m^3 ,藕池河东支 2.231 亿 m^3 ,藕池河西支 67.47 亿 m^3 ,季节性缺水问题突出;二是受地形因素限制,三口流域兴建提引水利工程不能有效解决工程性缺水问题。

通过对荆南三口流域四站(沙道观、弥陀寺、管家铺、康家岗)不同时段平均断流天数对比可知,水系连通功能变异下,松滋河东支沙道观站多年平均断流天数比变异前增加约 131 d;虎渡河弥陀寺站多年平均断流天数比变异前增加约 101 d,藕池河西支站管家铺站多年平均断流天数比变异前增加约 88 d,其东支康家岗多年平均断流天数比变异前增加约 23 d,断流天数的增加意味着可利用水资源量的减少,进而加剧了水资源开发利用的难度。断流天数的增加,水系连通不流畅,水流持续性打断,水资源短缺现象严重。据统计,藕池河西支管家铺站 11 月至次年 4 月常出现断流,一年中断流天数达到 267 d^[21],季节性水资源短缺问题凸显,旱灾频发,尤其是水系连通性变异后断流时间的延长,使得旱灾频率增大。

5 结 论

a. 水系连通性变异后荆南三口流域特征水位变化趋势显著,年平均水位降低,年最高水位、年最低水位年际相差增大,年径流量较小,变化幅度大且年内分配不均匀,易造成旱涝灾害,对水资源开发利用产生消极影响。

b. 水系连通性变异后荆南三口流域年径流量

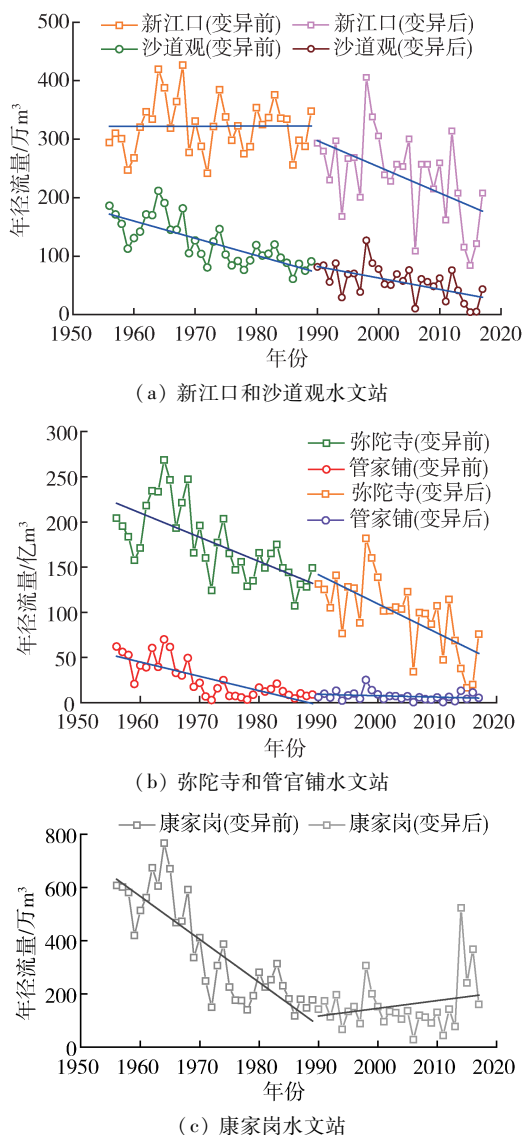


图3 水系连通性变异前后荆南三口流域年径流量变化
Fig.3 Annual runoff changes in the Three Outlets Basin of Southern Jingjiang River before and after the water system connectivity changes

呈下降趋势,月水资源量较变异前降幅大,从水资源开发利用的角度上讲,水系连通性变异后荆南三口流域水资源开发利用难度增大。

c. 水系连通性变异后荆南三口流域河系水文干旱次数增多,干旱历时增长,较高干旱历时频次和平均干旱历时增大,干旱强度和峰值增多,这意味着出现干旱事件的频次概率增大,时间增长,缺水量增多,水资源短缺问题严峻。

d. 水系连通性变异后荆南三口流域五河系年径流量地区分配不均衡,年际相差大,1994 年松滋河东支径流量 168.1 亿 m^3 ,松滋河西支 29.44 亿 m^3 ,虎渡河 76.45 亿 m^3 ,藕池河东支 2.231 亿 m^3 ,藕池河西支 67.47 亿 m^3 ,对荆南三口流域内水资源开发利用极为不利。

参考文献:

[1] 代稳,吕殿青,李景保,等. 水系连通变异下荆南三口河系水文干旱识别与特征分析[J]. 地理学报,2019,74(3):557-571. (DAI Wen, LV Dianqing, LI Jingbao, et al. Recognition and characteristics analysis of hydrological drought of the Sankou River System in Jingnan under the connectivity variation of the water system [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 557-571. (in Chinese))

[2] 邓鹏,孙善磊,黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):39-45. (DENG Peng, SUN Shanlei, HUANG Pengnian. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 39-45. (in Chinese))

[3] 翟正丽,桑学锋,顾世祥,等. 基于水资源配置平衡的云南省水系连通格局效果分析[J]. 水资源保护,2019,35(3):48-52. (ZHAI Zhengli, SANG Xuefeng, GU Sixiang, et al. Effect analysis of water system connectivity pattern in Yunnan Province based on water resources allocation balance [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3): 48-52. (in Chinese))

[4] 高玉琴,刘云苹,闫光辉,等. 秦淮河流域水系结构及连通度变化分析[J]. 水利水电科技进展,2020,40(5):32-39. (GAO Yuqin, LIU Yunping, YAN Guanghui, et al. Analysis on variation of water system structure and connectivity of Qinhuai River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(5): 32-39. (in Chinese))

[5] 王坤,许超,王文杰,等. 1980—2015 年清水河流域水系连通变化研究[J]. 北京大学学报(自然科学版),2019,55(4):747-754. (WANG Kun, XU Chao, WANG Wenjie, et al. Research on the connectivity changes of the Qingshui River Basin from 1980 to 2015 [J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 2019, 55

(4):747-754.]

[6] 邵玉龙,许有鹏,马爽爽. 太湖流域城市化发展下水系结构与河网连通变化分析:以苏州市中心区为例[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(10):1167-1172. (SHAO Yulong, XU Youpeng, MA Shuangshuang. Analysis of the change of the drainage system structure and river network connectivity in the urbanization development of the Taihu Basin: taking Suzhou downtown area as an example [J]. Yangtze River Basin Resources and Environment, 2012, 21(10): 1167-1172. (in Chinese))

[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. (JIN Meng, DOU Ming. Research on the evaluation of the impact of urbanization on the connectivity of the water system: taking Zhengzhou as an example [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(12): 41-44. (in Chinese))

[8] 傅春,李云翊,王世涛. 城市化进程下南昌市城区水系格局与连通性分析[J]. 长江流域资源与环境,2017,26(7):1042-1048. (FU Chun, LI Yunyi, WANG Shitao. Analysis of urban water system pattern and connectivity in the urban area of Nanchang in the process of urbanization [J]. Resources and Environment of the Yangtze River Basin, 2017, 26(7): 1042-1048. (in Chinese))

[9] 高玉琴,汤宇强,肖璇,等. 基于改进图论与水文模拟方法的河网水系连通性评价模型[J]. 水资源保护,2018,34(6):33-37. (GAO Yuqin, TANG Yuqiang, XIAO Xuan, et al. Evaluation model of river network hydrologic connectivity based on improved graph theory and hydrological simulation [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6): 33-37. (in Chinese))

[10] 高玉琴,肖璇,丁鸣鸣,等. 基于改进图论法的平原河网水系连通性评价[J]. 水资源保护,2018,34(1):18-23. (GAO Yuqin, XIAO Xuan, DING Mingming, et al. Evaluation of plain river network hydrologic connectivity based on improved graph theory [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1): 18-23. (in Chinese))

[11] 高玉琴,周桐,马真臻,等. 考虑天然水文情势的水库调度图优化[J]. 水资源保护,2020,36(4):60-67. (GAO Yuqin, ZHOU Tong, MA Zhenzhen, et al. Optimization of reservoir operation chart considering natural hydrological regime [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 60-67. (in Chinese))

[12] 周峰,吕慧华,许有鹏. 城镇化下平原水系变化及河网连通性影响研究[J]. 长江流域资源与环境,2017,26(3):402-409. (ZHOU Feng, LV Huihua, XU Youpeng. A study on changes of plain water system and river network connectivity under urbanization [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(3): 402-409. (in Chinese))

[13] 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. (LI Jingbao, YU Dandan, ZHANG Rui, et al., Xu Zhi. Features of connectivity evolution of the three outlets of the Jingnan River in the Yangtze River in the past 61 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(5): 1214-1224. (in Chinese))
- [14] 郑崧珍, 李欢, 李景保, 等. 环境变化下荆南三口河水文干旱演变特征及归因分析[J]. 冰川冻土, 2019, 41(4): 945-957. (ZHENG Yuzhen, LI Huan, LI Jingbao, et al. Hydrological drought evolution characteristics and attribution analysis of the Sankou River System in Jingnan under environmental changes[J]. Glacier and Frozen Soil, 2019, 41(4): 945-957. (in Chinese))
- [15] 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. (LI Jingbao, HE Meng, LYU Dianqing, et al. Effect of Hydrological Projects on Hydrologic Connectivity in the Three Outlets of Southern Jing River[J]. Tropical Geography. 2019, 39(1): 135-143. (in Chinese))
- [16] 赵贵章, 徐远志, 王莉莉, 等. 黄河上游青铜峡水利枢纽对河川基流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 195-201. (ZHAO Guizhang, XU Yuanzhi, WANG Lili, et al. Effect of Qingtongxia hydraulic project in upstream of Yellow River on river base flow[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(3): 195-201. (in Chinese))
- [17] 李景保, 于丹丹, 杨波, 等. 长江荆南三口水系调蓄能力演变及其与水系结构的关联性[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 19-26. (LI Jingbao, YU Dandan, YANG Bo, et al. Regulation capacity changing trend and its relation with river network structure in Jingnan Three Port of Yangtze River[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 19-26. (in Chinese))
- [18] 朱轶, 吕偲, 胡慧建, 等. 三峡大坝运行前后西洞庭湖鱼类群落结构特征变化[J]. 湖泊科学, 2014, 26(6): 844-852. (ZHU Yi, LYU Si, HU Huijian, et al. Changes in the structure characteristics of fish communities in West Dongting Lake before and after the operation of the Three Gorges Dam[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(6): 844-852. (in Chinese))
- [19] 李景保, 李雅婷, 蒋文杰. 三峡水库运行对长江荆南三口生态系统健康的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2016, 39(6): 15-19. (LI Jingbao, LI Yating, JIANG Wenjie. The impact of the operation of the Three Gorges Reservoir on the ecosystem health of the three outlets of the Yangtze River in Jingnan[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2016, 39(6): 15-19. (in Chinese))
- [20] 李景保, 罗中海, 叶亚亚, 等. 三峡水库运行对长江荆南三口水文和生态的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1285-1293. (LI Jingbao, LUO Zhonghai, YE Yaya, et al. The impact of the operation of the Three Gorges Reservoir on the hydrology and ecology of the Jingnan three mouths of the Yangtze River[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(4): 1285-1293. (in Chinese))
- [21] 李景保, 何霞, 杨波, 等. 长江中游荆南三口断流时间演变特征及其影响机制[J]. 自然资源学报, 2016, 31(10): 1713-1725. (LI Jingbao, HE Xia, YANG Bo, et al. Time evolution characteristics and influence mechanism of the three outlets of Jingnan in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(10): 1713-1725. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-04-09 编辑: 彭桃英)

(上接第 48 页)

- [64] 胡利民, 石学法, 王国庆, 等. 2011 长江中下游旱涝急转前后河口表层沉积物地球化学特征研究[J]. 地球化学, 2014, 43(1): 39-54. (HU Limin, SHI Xuefa, WANG Guoqing, et al. Study on the geochemical characteristics of the surface sediments from the Yangtze River estuary under the 2011 sharp turn from drought to flood in middle and lower Yantze River[J]. Geochmica, 2014, 43(1): 39-54. (in Chinese))
- [65] TIAN R, CAO L P, MA G R, et al. The use of HJ-1A/B satellite data to detect changes in the size of wetlands in response in to a sudden turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River system in China[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016, 7(1): 287-307.
- [66] JI Z H, LI N, WU X H. Threshold determination and hazard evaluation of the disaster about drought/flood sudden alternation in Huaihe River Basin, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017, 133: 1279-1289.
- [67] 牛建利, 何紫云, 张天宇, 等. 旱涝急转对生产、生活与生态的影响及应对措施效果分析: 以安徽省巢湖市槐林镇为例[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(增刊 1): 108-115. (NIU Jianli, HE Ziyun, ZHANG Tianyu, et al. Impact of sudden drought to flood change on manufacture livelihood and ecology: a case study from Huailin Town of Chaohu, Anhui Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(Sup1): 108-115. (in Chinese))
- [68] BI W, WENG B, YAN D, et al. Effects of drought-flood abrupt alternation on phosphorus in summer maize farmland systems[J]. Geoderma, 2020, 363: 114147.

(收稿日期: 2020-12-04 编辑: 施 业)