

近61年来长江荆南三口水系结构演变特征及其驱动因素分析

于丹丹, 杨波, 李景保, 何蒙, 徐志
(湖南师范大学 资源与环境科学学院, 湖南 长沙 410081)

摘要: 为了研究长江荆南三口水系结构演变状况, 利用其 1955、1978、1990、2008、2016 年 5 期地形图水系数据, 从数量、结构和复杂性特征方面定量分析河网密度、水面率、河网复杂度、支流发育系数和分维数这 5 个指标的变化特征, 并探讨其变化的驱动因素。结果表明: 数量特征上: 荆南三口的河流数量、河流长度、河网密度和水面率都在减少, 特别是低级别支流数量减少较多, 河网密度、水面率减少最明显的是华容河, 河网密度减少了 0.25 km/km², 水面率减少了 4.21%; 结构特征上: 支流发育系数下降明显, 衰减最为突出的是松滋河, 该水系片区支流发育系数 K 值衰减达 56.14%; 河网复杂度也呈下降趋势, 松滋河减少最多, 该水系片区河网复杂度 CR 值衰减达 54.41%, 由 44.98 下降到了 20.64; 说明该地区的河网发育正趋向于主干化和单一化; 复杂特征上: 水系分维呈下降趋势, 华容河减小幅度较大, 由 1.646 减少到 1.421, 水系复杂度出现简化趋势; 水系工程的建设引起的河道水沙时空输移过程及输送量改变, 是水系变化的主要驱动机制。

关键词: 荆南三口; 水系结构特征; 驱动因素

中图分类号: P343; TV211.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)04-0013-08

Analysis on the evolution characteristics and driving factors of the Jingnan Three Port river structure of Yangtze River in recent 61 years

YU Dandan, YANG Bo, LI Jingbao, HE Meng, XU Zhi

(College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: In order to study the river structure evolution situation of Jingnan Three Port of Yangtze River, this paper used topography river network data of 1955, 1978, 1990, 2008 and 2016, to quantitatively analyze the changing characteristics of river network density, water surface rate, river network complexity, branch development coefficient and fractal dimension from quantity, structure and complexity, and to explore the driving factors of its change. The results show that: quantitative features: the number of rivers, the length of river, the density of river network and the water surface rate reduced, especially the low tributaries are reduced. The river network density and water surface rate of Huarong river decreased the most, of which river network density declined by 0.25 km/km², water surface rate decreased by 4.21%; structural features: branch development coefficient declined obviously, and the most significant decrease happend on Songzi River. and its branch development coefficient K value declined 56.14%. And it also shows that river network density also declined, especially the Songzi River, and its river network complexity CR value decreased by 54.41%, which dropped from 44.98 to 20.64. It is indicated that the river network development in the region tends to be dominant and singularized; from the aspect of complexity, river network fractal dimension shows a decline trend, and the decline range of Huarong river is from 1.646 to 1.421. To sum up, the complexity of river network shows a simplified trend; the change of water and sediment time-space transportation process by river network engineering construc-

收稿日期: 2017-03-28; 修回日期: 2017-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071067); 湖南省"十二五"重点学科自然地理学建设项目

作者简介: 于丹丹(1992-), 女, 四川华蓥人, 在读硕士研究生, 主要从事遥感与地理信息技术应用研究。

通讯作者: 杨波(1974-), 男, 湖南张家界人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事资源环境与灾害遥感研究。

tion is the main driving mechanism of river network change.

Key words: Jing Nan Three Port; river structure characteristics; driving mechanism

1 研究背景

随着水资源的短缺及水资源的污染,特别是淡水资源的匮乏,人们开始认识到河流系统的重要性,河流系统是陆地水系统的重要组成部分,是水循环的主要载体,也是环境与自然生态的重要构成要素^[1]。河湖水系连通作为国家新形势下的一种治水方案,对其的研究尤为重要。

河网水系是指在自然营力作用下形成的河流、湖泊、沼泽和湿地等水体以及人类工程措施修建的人工河流、蓄滞洪区、堤坝水库等共同组成的一个复杂的“自然-人工”复合水系^[2-3]。也即是由大小不同、长度不等的河槽相互交错组成的网络状泄水系统。杨凯等^[4]对上海市的水系研究表明城市化会对水系结构产生影响,导致河流自相似性的削弱和结构趋向简单化。袁雯等^[5]在上海河网结构的研究表明城市化通过干扰河流结构自身发育规律,从而严重地影响河网调蓄能力。韩龙飞等^[6]、邵玉龙^[7]对长三角地区水系变化及秦淮河中下游进行了研究。徐光来等^[8]对杭嘉湖地区近 50 年水系空间分布和时间演化进行了研究。此外对太湖流域、浙东沿海和深圳等地区的水系结构变化都进行了研究^[9-11]。

从以上研究可以看出,以往的研究主要集中在对东部城市化水平较高区域的河流水系结构特征及方法,对中部、西部城市化水平较低地区水系结构特征及方法研究较少,特别是基于季节性河流,且又受到以水利工程为标志的人类活动剧烈影响的水系变化研究更是少见。

本文基于地理信息系统和遥感技术,分析了近 61 年来长江荆南三口河流水系结构变化特征及其驱动机制,以期对河流整治、河湖水系连通性工程设计与建设提供理论参考。

2 研究区域及数据来源与研究方法

2.1 研究区概况及区域划分

荆江是指长江干流枝城至城陵矶河段(藕池口以上称上荆州,以下称下荆州)。荆江南岸的松滋、虎渡、藕池、调弦四口简称荆南四口,调弦口于 1958 年冬堵口建闸,其后一直未分流,习惯上称荆南三口水系,位于 111°47'E ~ 112°19'E, 29°44'N ~ 30°13'N。本文以三口水系为研究区(图 1),考虑华容河的支流变化,把调

弦口分流的华容河也纳入研究范围,总面积为 4 150 km²。为了研究的需要,结合研究区的自然地理特征,以水系为单元,将研究区域划分为松滋河、虎渡河、藕池河、华容河等 4 大水系片区。

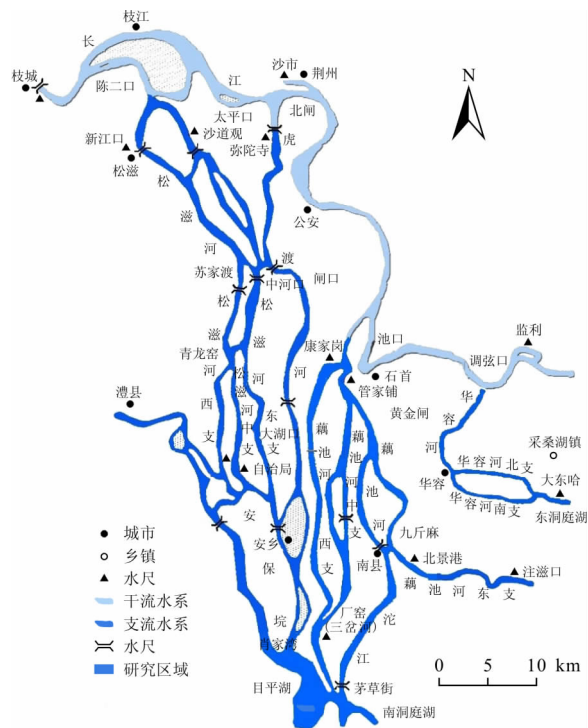


图 1 荆南三口示意图

2.2 数据来源及处理

研究所需的水系数据主要来源于各时段的地形图和遥感数据。其中 1955 年、1978 及 1990 年 3 期数据主要是通过湖南省水利厅提供的纸质地形图扫描,利用 GIS 矫正、配准、数字化裁剪和拼接等处理得到的 3 期水系数据。

遥感数据采用的是 2008 年和 2016 年美国陆地卫星 TM 影像,遥感影像采用 4、3、2 波段合成标准假彩色,利于信息提取。这两个时期的遥感影像在 ENVI 5.1 和 Arc GIS 9.2 的支持下,对遥感影像进行拼接、裁剪、目视解译并数字化,获取研究区水系结构图和属性数据,从而获得了 5 个时期的水系分布图(图 2)。在此基础上,采用斯特拉勒(Strahler)法对河流进行分级(Strahler 分级规则:直接发源于河源的小河为一级河流;两条同级别的河流汇合而成的河流级别比原来高一级;两条不同级别的河流汇合而成的河流的级别为两河流中的较高者;经此类推至干流,干流是水系最高级别河流)^[12],本文将

荆南三口地区河流分5个等级。1955-2016年断流天数取自湖南省水文水资源勘测局和湖南省水利厅网站水情日报表。

2.3 水系结构参数及计算

本文采用表征水系结构特征的指标体系,主要从数量、结构特征及复杂性等3方面选取河网密度、水面率、河网复杂度、支流发育系数和分维数等指标来分析研究区水系结构演变特征。

2.3.1 水系的数量特征 河网密度(D_R):也叫水道密度,是指单位面积内河流总长度,河网密度越大,表示区域内河流愈多,是用来衡量河流长度发育程度的指标。其计算公式如下:

$$D_R = L_R/A \tag{1}$$

式中: L_R 为区域内河流的总长度,km; A 为区域总面积,km²。

水面率(W_p):是指河道多年平均水位下河道水体所占有的实际水面积与区域总面积之比。其计算

公式如下:

$$W_p = (F_w/F) \times 100\% \tag{2}$$

式中: F_w 为河道多年平均水位下河道水体所占有的实际水面积,km²; F 为区域总面积,km²。

2.3.2 水系的结构特征 支流发育系数(K):代表支流的发育程度,反映河网水系的结构特征。其计算公式如下:

$$K = L_b/L_m \tag{3}$$

式中: L_b 为支流的河流长度,km; L_m 为主干河流长度,km。

河网复杂度(CR):河网复杂度被用于描述河网数量和长度的发育程度,其数值越大,说明该区域河网的构成层次越丰富,支撑主干河道的支流水系越发达。其计算公式如下:

$$CR = N_o \times (L/L_m) \tag{4}$$

式中: N_o 为河流等级数量; L 和 L_m 分别为河流总长度和主干河流长度,km。

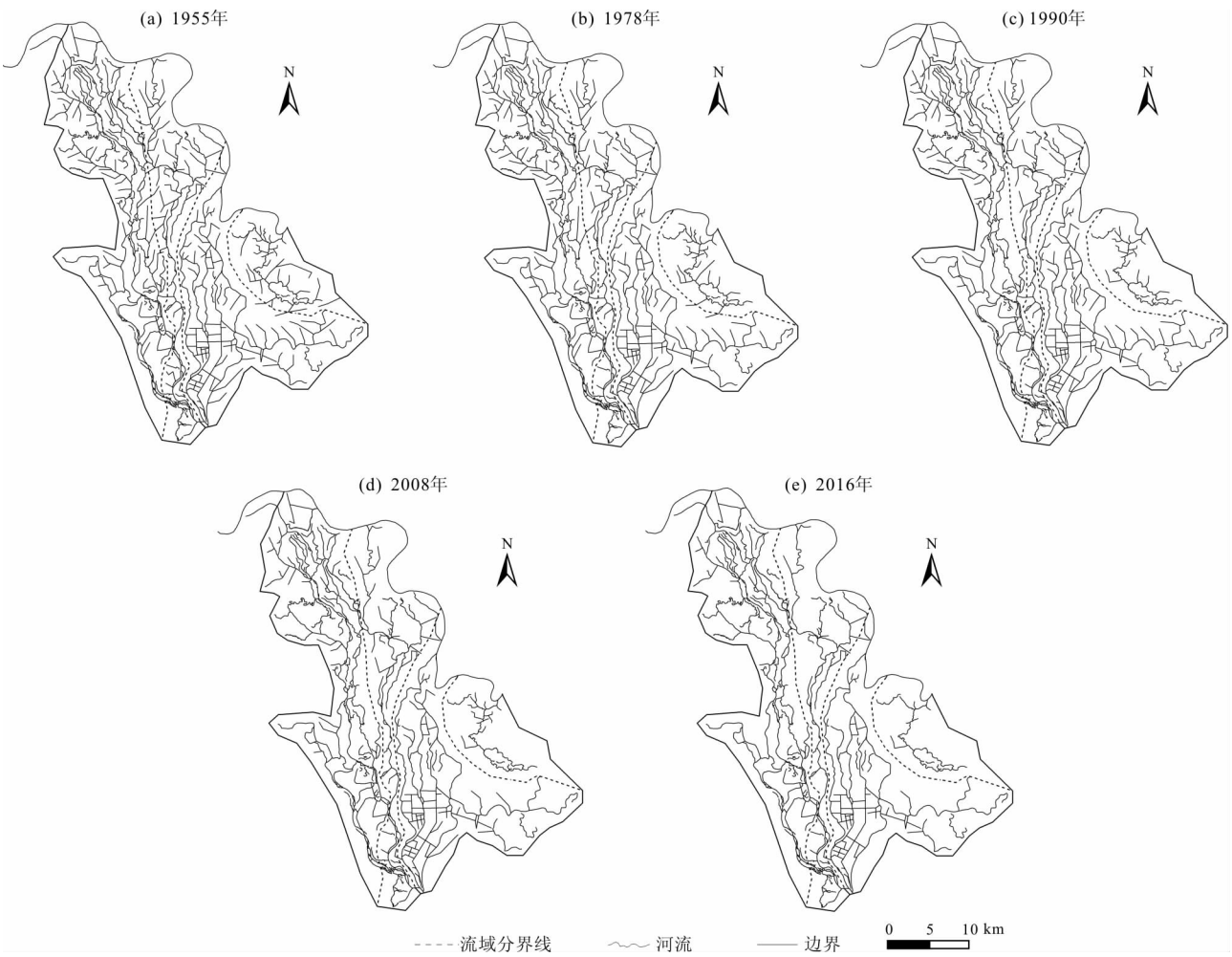


图2 长江荆南三口河网水系演变过程

2.3.3 水系的复杂性 水系分维数(D):主要用来描述河流的复杂程度,分维数数值越大表明河流越复杂,其值一般介于 1.5 ~ 2.0 之间。根据 La Barbera 和 Rosso (1987) 提出的方法^[13],水系分维数 D 采用如下公式计算:

$$D = \log R_b / \log R_L \tag{5}$$

式中: R_b 为水道分枝比; R_L 为河道长度比。

3 结果与分析

3.1 水系数量变化特征

3.1.1 河流数量变化 按前述的 Strahler 分级规则,长江荆南三口地区的河流分为 5 个等级(表 1),从表 1 可知,近 61 年间各等级河流数量都有一定程度的减少,但每一时期减少的速度均不一样。干流(第 5 级河流)数目没有减少,保证了荆南三口地区河流等级维持在 5 级,使该区域保持了较为完整的河流结构体系;1 级河流减少最多,减少率达到了 54.84%。1 ~ 4 级河流在 1955 - 1978 年的年均减少速率为 1.099%;1978 - 1990 年的年均减少速率下降到 0.543%,而 1990 - 2008 年的年均减少速率又上升到 1.458%,2008 - 2016 年的年均减少速率又下降到 0.543%。

表 1 荆南三口地区河流的数量(N_0) 条					
等级	1955 年	1978 年	1990 年	2008 年	2016 年
1	155	113	107	81	70
2	56	42	37	33	30
3	23	17	16	14	16
4	20	15	14	13	12
5	4	4	4	4	4

3.1.2 河流长度变化 通过测量与计算得到荆南

三口 1955 - 2016 年不同水系片的河流长度和河网密度变化值(表 2)。由表 2 显示:近 61 年来研究区的 4 个水系片的河流长度都呈不同程度的缩减,各水系片河流长度缩减的范围在 114.7 ~ 207.2 km 之间,其中虎渡河缩减最少,缩减了 114.7 km,藕池河减少最多,缩减 207.2 km,华容河缩减 139.61 km,松滋河缩减 161.6 km。1955 年研究区的 4 个水系片区的河道总长度为 2 183.67 km,2016 年则减少至 1 560.56 km,共缩减了 623.11 km。再以河流长度变化率而论,4 个水系片区的减少率在 16% ~ 25%,平均减少率为 20%。其中变化率最小的是虎渡河,减少率为 16%,变化率最大的为华容河,减少率为 25%。

3.1.3 河网密度变化 河网密度(D_R)不仅反映了单位面积上水系的发育程度,而且在一定程度上反映了水资源在流域内对生态环境和社会经济发展的支撑能力。通过对 1955 - 2016 年 5 期地形图和遥感图的处理得到了荆南三口地区的河网密度如表 2 所示。

从 1955 - 2016 年河网密度整体呈下降趋势即 1955 年研究区 4 个水系片区的平均河网密度为 0.60 km/km²,而 2016 年减少到 0.47 km/km²,其减少幅度达 0.20 km/km²。但各河系递减幅度存在一定的差异。以华容河系片区的河网密度减少幅度最大,由 0.62 km/km² 下降到 0.37 km/km²,减少了 0.25 km/km²;松滋河系片区由 0.72 km/km² 下降到 0.54 km/km² 其减少幅度为 0.18 km/km²;虎渡河系片区的河网密度由 0.67 km/km² 下降到 0.51 km/km²,其减少幅度为 0.16 km/km²,藕池河河系片区的河网密度由 0.7 km/km² 下降到 0.48 km/km²,其减少幅度为 0.22 km/km²。

表 2 荆南三口地区河长(L)和河网密度(D_R)变化										km, km/km ²	
水系	1955 年		1978 年		1990 年		2008 年		2016 年		1955 – 2016 年
	L	D_R	L	D_R	L	D_R	L	D_R	L	D_R	变化率/%
松滋河	680.8	0.72	616.9	0.65	580.8	0.61	556.1	0.58	519.2	0.54	18
虎渡河	481.3	0.67	445.7	0.62	410.5	0.57	385.4	0.54	366.6	0.51	16
藕池河	670.7	0.70	593.8	0.62	523.6	0.55	505.7	0.53	463.5	0.48	22
华容河	350.8	0.62	294.8	0.52	251.4	0.45	225.5	0.40	221.3	0.37	25
合计/平均	2183.6	0.68	1951.2	0.60	1766.3	0.55	1672.7	0.51	1560.6	0.48	20

3.1.4 河流水面率变化 流域内适宜的水面率,对调节局部气候、防洪排涝和改善生态环境具有重大意

义。根据计算公式(2)得到研究区域的河流水面率(表 3),由表 3 可知,荆南三口河系水面率呈整体下

降趋势。以多年平均值而言,近 61 年松滋河、虎渡河、藕池河和华容河水面率分别减少了 2.76%、2.87%、3.03% 和 4.21%,华容河的水面率减少幅度最大。再以各时期的多年平均值而论,1955 – 1978 年松滋河、虎渡河、藕池河和华容河 4 水系片的水面率分别减少了 1.13%、0.56%、0.71% 和 2.69%;1978 – 1990 年松滋河、虎渡河、藕池河和华容河 4 水系片的水面率分别减少了 0.84%、1.55%、1.13 和 1.43%;1990 – 2008 年松滋河、虎渡河、藕池河和华容河 4 水系片的水面率分别减少了 0.76%、0.45%、0.97% 和 0.03%;2008 – 2016 年松滋河、虎渡河、藕池河和华容河 4 水系片的水面率分别减少了 0.03%、0.31%、0.22% 和 0.06%。其中 1978 – 1990 年各水系片区的水面率减少最明显,到近几年减小幅度在缩小,表明河流长度和河流数目减小、部分低级河道消失,从而使整体河流数目呈减少趋势。2008 – 2016 年由于大量水利工程投入使用,使低级河流数目、河流长度减少速度下降,水面率减少趋势得到了缓解。

表 3 荆南三口地区水面率(W_p)变化 %

水系	1955 年	1978 年	1990 年	2008 年	2016 年
松滋河	18.19	17.06	16.22	15.46	15.43
虎渡河	15.54	14.98	13.43	12.98	12.67
藕池河	20.38	19.67	18.54	17.57	17.35
华容河	13.66	10.97	9.54	9.51	9.45

3.2 水系结构变化特征

3.2.1 河流分支发育系数变化 河流分支发育系数

表征的是支流发育的程度。根据(3)式计算得到荆南三口各水系片区支流发育系数 K 值(表 4),表 4 反映了各水系片区支流发育系数 K 值的异质性。河流密集的藕池河支流发育系数 K 值最高,5 期平均值为 7.05;而河网稀疏的华容河支流发育系数较低,5 期平均值为 3.96;松滋河和虎渡河支流发育系数 K 值的平均值分别为 5.28、4.52。从整体上看,近 61 年荆南三口地区 4 个水系片区的支流发育系数 K 值都呈衰减趋势,其中以松滋河系片区最为突出,该水系片区 1955 – 2016 年支流发育系数 K 值衰减率达 56.14%,水系结构的稳定度堪忧;虎渡河、藕池河、华容河的衰减率分别为 36.11%、32.50%、30%。

3.2.2 河网复杂度变化 河网复杂度表征的是河网结构的复杂程度,该指标在表征水网结构的良好度时有重要意义。通过公式(4)计算得到荆南三口河网复杂度变化特征值(表 4),研究区近 61 年河网复杂度呈下降趋势,河网复杂度的数值在不同水利片区的差异很大。藕池河 CR 值最高,5 期平均值为 33.814;华容河最低,5 期平均值为 17.558;松滋河和虎渡河分别为 29.998、27.882。近 61 年荆南三口 4 个水系片区的河网复杂度都呈衰减趋势,以松滋河最为突出,该水系片区 1955 – 2016 年河网复杂度 CR 值由 44.98 下降到了 20.64,其衰减率达 54.41%;虎渡河、藕池河、华容河的衰减率分别为 25.46%、42.7%、40.38%。河网复杂度越小,河网结构越简单,河网复杂度下降,说明该地区的河网发育正趋向于主干化和单一化。

表 4 荆南三口地区支流发育系数(K)和河网复杂度(CR)变化

年份	松滋河		虎渡河		藕池河		华容河	
	K	CR	K	CR	K	CR	K	CR
1955 年	7.98	44.98	5.87	32.63	8.86	46.32	4.90	23.45
1978 年	6.48	33.74	4.64	30.56	7.23	37.42	4.13	19.34
1990 年	4.50	26.74	4.32	26.12	6.74	30.34	3.78	16.35
2008 年	3.95	23.89	4.05	25.78	6.45	28.45	3.54	14.67
2016 年	3.50	20.64	3.75	24.32	5.98	26.54	3.43	13.98
平均	5.28	29.998	4.53	27.882	7.05	33.814	3.96	17.558

3.3 水系复杂性变化特征

水系分维 D 可评价水系复杂性, D 值越大说明水系越复杂,反之水系则越简单^[14]。La Barbera 等^[13]认为 D 值应在 1 ~ 2 之间,平均 1.6 ~ 1.7。Claps 等^[15]认为 D 平均值在 1.7 左右。李后强

等^[16]、何隆华等^[17]认为水系分维数可以反映河流的发育阶段: $D \leq 1.6$ 时,河流发育不充分,河网密度小,流域地貌处于发育初期; $1.6 < D \leq 1.9$ 时,流域发育初期结束,处于成年期; $D > 1.9$ 时,流域侵蚀作用显著,河流发育进入老年期并渐趋稳定。基

于 La Barbera 等^[13]给出 D 的计算公式 (5) 计算得出该地区的 5 期 D 值(表 5)。由表 5 可知,1955 年,4 个水系片区的分维数都在 1.5 ~ 2 之间,满足 La Barbera 等所证明的范围。从变化率来看,近 61 年来荆南三口地区 4 个水系片区的分维数均呈下降趋势,其中华容河减小幅度较大,由 1.646 减少到 1.421,到 2008 年之后,虎渡河与华容河分维数已经小于 1.5,表明水系的结构简单化趋势尤为明显。水系分维数的下降反映了水系结构自相似性被破坏,自然发育过程受到其他因素的扰动,水系复杂度出现简化趋势。

表 5 荆南三口地区水系分维数(D)变化特征					
水系	1955 年	1978 年	1990 年	2008 年	2016 年
松滋河	1.719	1.606	1.582	1.561	1.523
虎渡河	1.642	1.629	1.583	1.563	1.417
藕池河	1.938	1.907	1.854	1.757	1.635
华容河	1.646	1.587	1.547	1.453	1.421

4 水系结构演变的驱动因素

水系结构演变过程是自然力与人类活动方式综合作用的结果,以荆南三口河系地区而言,以水利工程为标志的人类活动对水系结构产生了重大影响。该地区既是我国重要的商品粮、棉、油生产基地,又是水旱灾害、血吸虫病频繁发生的地区。为治理水旱灾害、血吸虫病,近 61 年来三口河系历经了人类活动(内外部水利工程)的剧烈影响,正因为如此,使河湖水系结构特征值发生了重大变化。

4.1 三口地区各时期河道整治工程对水系结构变化的影响

新中国成立后,荆南三口河系与洞庭湖区一样展开了连续性的综合治理,其治理工程历经了 3 个阶段:

(1)1949 – 1985 年,进行了堵支并垸、排旗、撇洪河配套等治理工程的初期建设。其中 20 世纪 50 年代,主要通过堵支并垸、整治河道、兴建涵闸等工程措施改变历史上水系紊乱、堤防残破的局面;60 年代主要从事垸内电排建设、渠系调整和渠系建筑物配套;70 – 80 年代初持续性田园化建设及渠系配套。

(2)1986 – 1996 年,一期治理工程。主要对重点堤防进行加高加固,并对干流河道整治进行了试验性建设,较大幅度地提高了干流河道(洪道)的过

流能力。

(3)1997 – 2010 年,二期治理工程。主要实施了堵支强干即藕池河东、中、西支洪道整治工程,淞池河东、中、西支洪道整治工程,水利灭螺以及“平垸行洪,退田还湖工程”。

这些连续性的综合治理工程建设保证了各个时期三口河系干流的稳定,保持了较完整的河流体系结构,导致支流长度、数量减少,特别是 1 级河流长度、数量减少最多,进而影响该地区的河网密度、河网复杂度、分维数等水系结构特征。

4.2 长江中上游各时期水利工程活动对水系结构变化的影响

1955 年以后,长江中上游兴建了许多大中型水利工程,如 1958 年调弦堵口、1967 年下荆江三处裁弯开始、1973 年下荆江三处(中洲子、沙滩子、上车弯)裁弯结束、1981 年葛洲坝截流发电、2003 年三峡水库运行。这些相继运行的水利工程改变了长江中下游河道水沙时空输移过程及输送量,从而导致了三口分流能力和分沙能力(三口分流分沙与长江干流枝城站水沙之比)均呈逐期减少趋势(表 6、表 7)。河流是水、沙的载体,水、沙与河床之间表现为一种整体联系和互相作用的关系。水沙量及其组合条件的改变势必影响水系结构变化。一方面径流是水系结构形成的基础,充足的径流量是水系发育和水网密度增加的前提^[18]。调弦口于 1958 年冬堵口建闸,其后一直未分流,调弦口形成全年断流的状态,没有径流的注入,以至于华容河是荆南三口河网密度、水面率减少最明显的河系。随着三口分流的逐期减少,三口 4 站(沙道观、弥陀寺、康家康、管家铺)年径流量历年变化与历年总断流天数变化过程呈负相关^[19],即年径流量随断流天数增加而减少,1955 – 2016 年 4 个时期中的年平均断流天数均呈增加趋势(表 8),其中以藕池河口的康家岗的断流时间最长,这正是导致藕池口西支水系结构改变最显著的症结所在。另一方面水、沙是改变河床形态的动力和物质基础,水、沙冲淤作用(冲淤过程转换与差异)可改变水系结构形态特征。也就是说水流是河槽(床)的直接动力,径流变幅、各流量级持续时间等要素决定了水沙两相流体的造床动力特征,泥沙(悬、推移质)则是改变河床形态的物质基础,沙量的多少、颗粒的粗细级配影响着河床变形的方向,不同的水沙组合条件决定了河床的平面形态和断面特征。根据长江水利委员会水文局的观测,2003 – 2011 年,荆江三口分流河道都出现了冲刷,

累积冲刷约 $0.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。但冲刷主要发生在 2003–2006 年,之后冲刷较少。观测结果与有关数学模型预测结果基本一致^[20–22]即在典型水文系列及运用条件下,三峡水库运用后前 6 年藕池河及松滋河

均发生冲刷,之后藕池河有所回淤,松滋河继续冲刷。河道泥沙的冲淤交替,影响三口地区的河流长度、数量,进而影响河网密度、河网复杂度、分维数等水系结构特征。

表 6 荆南三口各时期分流能力^[19]m³/s

统计时段	新江口 分流量	沙道观 分流量	弥陀寺 分流量	康家岗 分流量	管家铺 分流量	三口 合计	枝城 径流量	三口 分流比/%
1955–1966 年	322.6	162.5	209.7	48.8	588.0	1331.6	4515	29.40
1967–1972 年	321.5	123.9	185.8	21.4	368.8	1021.4	4302	24.30
1973–1980 年	322.7	104.8	159.9	11.3	235.6	834.3	4441	19.10
1981–2002 年	286.3	74.5	129.5	10.0	162.2	662.5	4446	15.20
2003–2016 年	233.3	56.1	90.5	4.4	112.6	496.9	4202	11.80

表 7 荆南三口各时段多年平均输沙量与分沙比10⁴ t

统计时段	枝城	新江口	沙道观	弥陀寺	康家岗	管家铺	三口合计	三口分沙比/%
1951–1966 年	55300	3450	1900	2400	1070	10800	19590	35
1967–1972 年	50400	3330	1510	2130	460	6760	14190	28
1973–1980 年	51300	3420	1290	1940	220	4220	11090	22
1981–2002 年	41850	2825	810	1330	145	2375	7485	18
2003–2014 年	7460	440	134	155	16	339	974	13

表 8 荆南三口各时期平均断流天数时空变化

统计时段	多年平均年断流天数			
	沙道观	弥陀寺	藕池(管)	藕池(康)
1955–1978 年	18	37	71	251
1979–1990 年	155	140	163	253
1991–2008 年	181	162	173	257
2009–2016 年	199	178	186	267

4.3 城镇化对水系结构变化的影响

2008 年研究区的城镇化率为 27.2%,2016 年为 28.11%,城镇空间扩展使得河道缩窄、河流长度、面积缩小,低等级河道被填埋、水系数量、结构、复杂度有一定程度的降低。城市化初期人类活动影响较小,水系变化不显著;随着城市化的进一步发展,影响增加,水系变化逐渐显著^[23]。但研究区流域的城镇化水平总体较低,对河网水系的整体影响不大。但随着城镇化速度加快,城镇建设用地增加,城镇化对河网水系的影响会愈来愈显著^[10]。

5 结论与讨论

近 61 年来,为治理水旱灾害、血吸虫病,三口河

系历经了人类活动(内外部水利工程)的剧烈影响,致使其水系结构在人类活动干扰下发生演变,研究结果如下:

(1)数量特征上,研究区 1955–2016 年阶段,河流数目、河流长度、河网密度、水面率整体呈下降趋势,华容河河网密度、水面率减少最明显;结构特征上,近 61 年来,荆南三口地区支流发育系数、河网复杂度呈衰减趋势,以松滋河衰减最为突出,该水系片区河网复杂度 CR 值衰减达 54.41%,由 44.98 下降到了 20.64,河网复杂度下降,说明该地区的河网发育正趋向于主干化和单一化;复杂特征上,近 61 年来荆南三口地区水系分维呈下降趋势,到 2008 年之后,虎渡河与华容河分维数已经小于 1.5,反映了水系结构自相似性被破坏,自然发育过程受到其他因素的扰动。

(2)以荆南三口河系地区而言,以水利工程为标志的人类活动对水系结构产生了重大影响,三口地区各时期河道整治工程保证了各个时期三口河系干流的稳定,没有明显的变化,保持了较完整的河流体系结构;长江中上游各时期的水利工程改变了长江中下游河道水沙时空输移过程及输送量,从而导

致了三口分流能力和分沙能力均呈逐期减少趋势,水沙量及其组合条件的改变势必影响水系结构变化;城镇化对该区水系的影响逐渐增大。

(3)受水利工程活动剧烈影响的水系结构变化比城市化的影响要大。其区别在于城市化对水系结构的影响主要取决于城市化水平的高低,城市化越高的地区,河流水系衰减、水面率下降、支流退化、河网复杂度下降越严重^[6],主要是对局部水系产生影响。而水利工程活动,对其河流的上下游水系结构均会产生影响,不再局限于局部而是整体,因此水利工程活动对水系结构的影响更剧烈。

参考文献:

- [1] 倪晋仁,刘元元. 受损河流的生态修复[J]. 科技导报, 2006, 24(7): 17-20.
- [2] 李宗礼,李原园,王中根,等. 河湖水系连通研究:概念框架[J]. 自然资源学报,2011,26(3):513-522.
- [3] 徐宗学,庞博. 科学认识河湖水系连通问题[J]. 中国水利,2011(16):13-16.
- [4] 杨凯,袁雯,赵军,等. 感潮河网地区水系结构特征及城市化响应[J]. 地理学报,2004,59(4):557-564.
- [5] 袁雯,杨凯,唐敏,等. 平原河网地区河流结构特征及其对调蓄能力的影响[J]. 地理研究,2005,24(5):717-724.
- [6] 韩龙飞,许有鹏,杨柳,等. 近50年长三角地区水系时空变化及其驱动机制[J]. 地理学报,2015,70(5):819-827.
- [7] 邵玉龙,许有鹏,邵玉龙,等. 城市化对水系结构及其连通性的影响:以秦淮河中下游为例[J]. 湖泊科学,2013,25(3):335-341.
- [8] 徐光来,许有鹏,王柳艳. 近50年杭-嘉-湖平原水系时空变化[J]. 地理学报,2013,68(7):966-974.
- [9] 王柳艳,许有鹏,余铭婧. 城镇化对太湖平原河网的影响-以太湖流域武登锡虞区为例[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(2):151-156.
- [10] 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.
- [11] 陈云霞,许有鹏,付维军. 浙东沿海城镇化对河网水系的影响[J]. 水科学进展,2007,18(1):68-73.
- [12] Strahler A. Hypsometric analysis of erosional topography[J]. Geological Society of America Bulletin, 1952, 63(11):1117-1142.
- [13] Tarboton D G, Bras R L, Rodriguez-Iturbe I. The fractal nature of river networks[J]. Water Resources Research,1998,24(8):1317-1322.
- [14] Cheng Jicheng, Jiang Meiqiu. Mathematical models for rain gauge morphology[M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [15] Claps P, Oliveto G. Reexamining the determination of the fractal dimension of river networks[J]. Water Resources Research,1996,32(10):3123-3135.
- [16] 李后强,艾南山. 分形地貌学及地貌发育的分形模式[J]. 自然杂志,1992,15(7):516-519.
- [17] 何隆华,赵宏. 水系的分形维数及其含义[J]. 地理科学,1996,16(2):124-128.
- [18] 凌红波,徐海量,乔木,等. 1958-2006年玛纳斯河流域水系结构时空演变及驱动机制分析[J]. 地理科学进展,2010,29(9):1129-1136.
- [19] 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.
- [20] 方春明,毛继新,陈绪坚. 三峡水库蓄水运用后荆江三口分流河道冲淤变化模拟[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2007,5(3):181-185.
- [21] 方春明,胡春宏,陈绪坚. 三峡水库运用对荆江三口分流及洞庭湖的影响[J]. 水利学报,2014,45(1):36-41.
- [22] 李景保,代勇,欧朝敏,等. 长江三峡水库蓄水运用对洞庭湖水沙特性的影响[J]. 水土保持学报,2011,25(3):215-219.
- [23] 江燕,薛丽芳,于红学,等. 近30年来南四湖流域城市化进程中的水系变化分析[J]. 湖泊科学,2017,29(1):135-142.