

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 05. 004

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

李景保,于丹丹,杨 波,代 稳,李 欢

(湖南师范大学资源与环境科学学院,湖南 长沙 410081)

摘要:基于 1955 年、1978 年、1990 年、2008 年、2016 年 5 个时期的河网单位面积槽蓄容量和单位面积可调蓄容量、河网槽蓄容量和可调蓄容量 4 个指标参数,对比分析了三口地区水系调蓄能力时空变化,运用相关分析法剖析了水系结构与调蓄能力的关系。结果表明:①河网槽蓄容量由 1955 年的 9 548. 52 万 m³ 减至 2016 年的 7 049. 01 万 m³,减少了 26. 17%;河网可调蓄容量由 1955 年的 4 696. 39 万 m³ 逐渐减至 2016 年的 2 461. 13 万 m³,共减少 47. 59%。②河网单位面积槽蓄容量和河网单位面积可调蓄容量具有明显的等级差异,单位面积可调蓄容量以低等级河流(1、2、3 级)减少幅度最大,而 4 级和 5 级河流的调蓄能力各指标参数减少值相对较低。③在 5 个时期中各水系区河网槽蓄能力和可调蓄能力均呈不断下降的态势,其中以藕池河水系区衰退程度最大,河网单位面积槽蓄能力和单位面积可调蓄能力最弱的是虎渡河水系区。④水系调蓄能力与河网结构特征、河流水文连通、水系连通度、水系连通性均在 0. 01 水平上,呈显著正相关。

关键词:水系结构;水系连通;调蓄能力;荆南三口水系

中图分类号:TV213. 4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2019)05 - 0019 - 08

Regulation capacity changing trend and its relation with river network structure in Jingnan Three Port of Yangtze River//LI Jingbao, YU Dandan, YANG Bo, DAI Wen, LI Huan(*College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China*)

Abstract: Based on four index parameters of tank storage capacity per unit area, adjustable storage capacity per unit area, channel storage capacity in river network and adjustable storage capacity in 1955, 1978, 1990, 2008 and 2016, the spatial and temporal variations of water system storage capacity in Jingnan Three Port of Yangtze River are compared and analyzed, and the relationship between water system structure and storage capacity is analyzed by correlation analysis method. The results show that: (1) The storage capacity of river network channel decreased by 26. 17% from $9\,548.52 \times 10^4\text{ m}^3$ in 1955 to $7\,049.01 \times 10^4\text{ m}^3$ in 2016. The adjustable storage capacity of river network gradually decreased from $4\,696.39 \times 10^4\text{ m}^3$ in 1955 to $2\,461.13 \times 10^4\text{ m}^3$ in 2016, a total decrease of 47. 59%. (2) There are obvious gradation differences between channel storage capacity per unit area of river network and adjustable storage capacity per unit area of river network. The adjustable storage capacity per unit area of the low-grade River (grades 1, 2 and 3) decreases the most, while the parameters of the four-grade and five-grade rivers decrease relatively low. (3) In the five periods, the storage capacity and adjustable storage capacity of the river network in each river system area have been declining. Among them, the decline of the Ouchi river system area is the greatest, and the lowest of the channel storage capacity and adjustable storage capacity per unit area of the river network is the Hudu River system area. (4) There is a significant positive correlation between water system storage capacity and the structure characteristics of river network, river hydrological connectivity, and connectivity degree of river network and river network connection at the level of 0. 01.

Key words: river network structure; hydrological connectivity; regulation capacity; river network of Jingnan Three Port

基金项目:国家自然科学基金(41571100);湖南省重点学科(地理学)建设项目

作者简介:李景保(1951—),男,教授,主要从事水文水资源研究。E-mail:lijingbao1951@126.com

河流系统是自然界最重要的生态系统之一^[1],是水资源形成与演化的主要载体,是人类社会发展的重要支撑^[2]。流域水系具有水资源调配、泄洪排涝、供水、蓄水、净化水质、航运、水景、生态修复等自然功能和社会功能,特别是河网调蓄在削减洪峰、降低洪水危害中具有重要作用。随着区域经济社会的发展,人类活动干扰下的河流结构趋于简化,河流数量减少^[3],进而削弱了河网的自然调蓄能力^[4]。河网功能、河流结构与河网调蓄能力之间的关系越来越受到关注。目前对水系调蓄能力的研究,主要侧重于4个方面:①对湖泊调蓄能力的研究^[5-6],从不同角度系统分析构造运动、围垦、泥沙淤积以及裁弯取直等影响湖泊调蓄能力的因素及其影响程度;②对不同尺度流域水系调蓄能力的研究^[7],其研究方法是通过建立DEM模型和淹没水位、淹没面积和淹水量之间的回归关系,估算出区域水系的洪水调蓄容量;③对河网调蓄能力的研究^[8-11],通过建立河网产汇流模拟模型,用不同的方式概化河网,计算其调蓄容量;④借助SOBEK模型建立简化区域河网模型,并通过设置不同的河流形态和结构情景,模拟河网结构变化对河网调蓄能力的影响,为基于调蓄目标的河网改造和水系综合整治提供量化技术支持^[12-14]。

荆南三口河系位长江中游(荆江)南岸,是连接荆江与洞庭湖的水流通道。近60多年来受纵横交错的水利工程影响,河网密度、水面率、河网复杂度、支流发育系数、分维数等水系结构特征值均呈较大幅度的减少或下降趋势^[15],导致该地区河流断流时间延长,枯期水资源短缺^[16-18]。本文首先对河网调蓄能力进行计算,然后分析不同等级河流调蓄能力的时间变化,再对比分析不同水系片区调蓄能力的空间差异,最后用相关分析法分析水系结构与调蓄能力的关联程度。该研究旨在对生态河网建设,恢复河流生态结构,维系河流健康,以及实施河湖水系连通工程提供借鉴。

1 站点选择与三口水系调蓄能力计算

1.1 研究时期与河网区系的划分

荆南三口水系是沟通长江与洞庭湖北部地区的水流通道,主要由松滋河、虎渡河、藕池河、华容河(1958年堵口建闸)分泄长江水入洞庭湖北部的河道所组成的平原水网(图1)。为了便于比较研究,首先,依据水利工程运行时间将1951—2016年划分5个时期即1951—1955年、1956—1978年、1979—1990年、1991—2008年、2009—2016年,并选取1955年(相对稳定期即基准期)、1978年(下荆江三处裁弯工程后)、1990年(葛洲坝水利枢纽运行后)、

2008年(三峡水库试验性蓄水运行及退田还湖工程初期)、2016年(三峡水库及退田还湖稳定期)的水系纸质图、地形纸质图和影像图,其比例尺均为1:50 000,以保持相关资料的一致性。基于水系的完整性,以天然水系为单元,将荆南三口水系划分为松滋河、虎渡河、藕池河、华容河4大水系片区(图1,表1)。依据河道普查资料对河网开展分析后确定1~2级河流河水深度取值2.00 m,3~4级河流河水深度取值5.00 m,5级主干河流河水深度取值6.00 m。

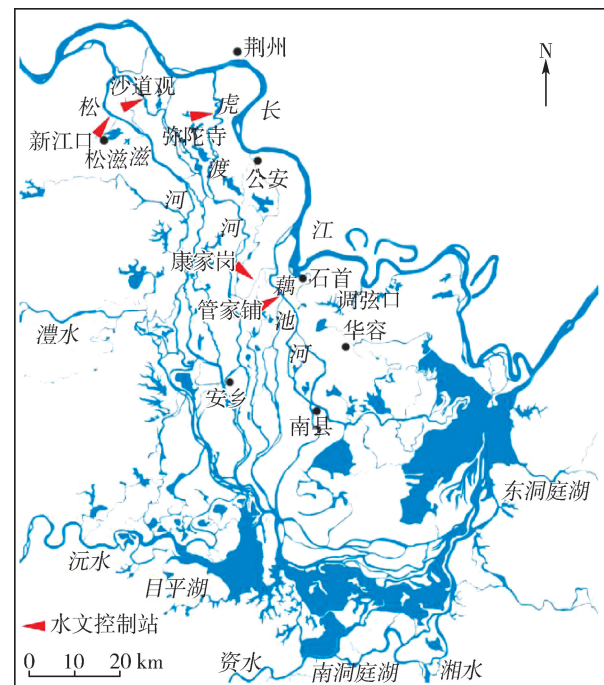


图1 荆南三口河系主要水文站点分布

1.2 水系调蓄能力指标的设定与计算方法

基于水系调蓄能力的内涵,同时考虑数据的可获取性,在松滋河、虎渡河、藕池河三大水系中各取一处具有代表性的水位站,分别为新江口、弥陀寺和管家铺站,并从荆州水文局获取以上3站的多年平均水位、警戒水位和历年最低日水位。基于荆南三地区河道特征资料的可取性,选择槽蓄容量、可调蓄容量、单位面积槽蓄容量和单位面积可调蓄容量4个指标,并进行量化,用其值表征三口水系调蓄能力。

a. 槽蓄容量。槽蓄容量代表的是河流水位在一般情景下河道所承载水体的总容量,在本文中代表的是荆南三口地区的河流水位在常水位时河道所承载水体的总容量。其数值的变化直接反映水系容蓄水量及涝水的调度能力,对区域水环境容量的确定、水资源调度以及防洪排涝都有重大意义。以黄海高程作为各水位站点的基准面,每个水位站点所对应的水位值应该是稍高于实际所测量的水位值。由于该地区位于洞庭湖北部地区,地形较为平缓,流域内河流众多,水系结构和连通变化较为复杂,因

表 1 荆南三口地区水系片区划分及各片区的概况

水系片区	各水系片区概况
松滋河	松滋入口后分东西两支,东支从松滋口进入后往东经沙道观、米积台、浦田咀至中河口,往东有一支经黑狗河垸入虎渡河,东支主流仍循南坪、沙窝等在瓦窑与西支汇合,全长 87.35 km。西支从松滋河起经新江口、新垸、狮子口等支流至瓦窑河(83.36 km)逐渐与东支汇合后又分为三支;即东支(大湖口河)全长 42 km,中支(自治局河)全长 28.93 km,西支(官垸河)全长 35.5 km
虎渡河	虎渡河全长 133.3 km,自太平口分泄长江水经弥陀寺、黄金口至黑狗垸,松滋东支河口汇入,在经黄山头南闸进入湖南省境内,经大杨树、董家垸、陆家渡至小河口与松滋河汇合,其中从南闸至小河口全长 42.7 km。湖北省境内从太平口至黄山头南闸全长 90.6 km。荆江分洪工程建成后,南闸建成,南闸以下又称陆家渡河
藕池河	藕池河从入口处分为康家岗、管家铺二口,全长 193.5 km,从其分合关系,习惯上分为东支、西支、中支。从藕池河入口后经康家岗、管家铺、胡子口、注滋口、新洲等注入东洞庭湖,全长 91 km,称藕池东支;从黄金咀往西有一支流南下称藕池中支,在湖南境内称荷花咀河;从黄金咀经团山寺至陈家岭分为东西两支,西支称陈家岭小河,两支流汇合后至茅草街运河与松、澧、虎洪道合流后注入洞庭湖
华容河	长江水进入后在湖北省境内称调弦河,在湖南省境内称华容河。经焦山镇至大王山进入石山矶至华容县城分南、北两支,其中间为华容县、新华垸,至罐头尖汇合,经旗杆咀入湖。从调弦口至旗杆咀全长 60.5 km,其中湖北石首段长 12 km,湖南华容段 35.5 km,君山段 13 km。1958 年冬上游建调弦口闸控制,下游在旗杆咀建六厅闸,从此不再分泄长江水入湖

此,为使计算更加简便,把河道看作是矩形的,槽蓄容量 C 的计算公式为

$$C = (A_h - D_g)LW \tag{1}$$

式中: A_h 为正常水位; D_g 为河水深度; L 为河道长度; W 为河流的对应宽度。

b. 可调蓄容量。可调蓄容量是指河流在一般情况下,可以连续最大限度承载水体的总容量,或者说是河道从某一水位上升到一定水位(通常是指由低水位上升到警戒水位)时这一时段矩形河道所承载水体的总容量。在防洪的角度来看,河网可调蓄容量 A_c 对洪水调蓄作用尤为明显,其计算公式为

$$A_c = C_j - C_i \tag{2}$$

式中: C_j 为河流在警戒水位时所对应的槽蓄容量; C_i 为河流在最低水位时的槽蓄容量。

c. 单位面积槽蓄容量。单位面积槽蓄容量表示水位在一般条件下河网槽蓄容量和区域面积之比,它是对河网调蓄能力的一种直观反映。比值越大,也就直观地反映出研究区域内河网的蓄水能力相对较强。单位面积槽蓄容量 S_R 的计算公式为

$$S_R = C/A \tag{3}$$

式中 A 为研究区所对应的水系片区的面积。

d. 单位面积可调蓄容量。单位面积可调蓄容量是指河道水位由某一水位上升到一定水位时这一时段矩形河道所承载水体的总容量,即为与所计算河流的区域面积之间的比值,表示的是所计算对应区域河道对洪水的调节能力。单位面积可调蓄容量 A_{SR} 的计算公式为

$$A_{SR} = A_c/A \tag{4}$$

基于参考文献[18-19],获取荆南三口地区各水系片区及各不同等级河流的长度、宽度、数目等基本数据,并通过荆州水文局得到各水位站点相应的水位数据。再运用式(1)~(4)分别计算该研究地区各水系片区槽蓄容量 C 、可调蓄容量 A_c 、单位面积

槽蓄容量 S_R 、单位面积可调蓄容量 A_{SR} 。值得指出的是,在计算以上 4 个参数时,为了使计算得以实现做如下假设:①河流的河床假设其为矩形,这样的假设是为了使河断面宽度不随水深变化而产生不同的宽度;②假设研究区域人类活动对小河流的宽度变化影响不大,且河流宽度没有固定数值,处于不断变化之中。根据荆南三口地区的河势,1 级河流的河宽度统一取值 5.0 m,2 级河流 15.0 m,3 级河流 30.0 m,4 级河流 40.0 m,5 级河流 60.0 m。

2 水系调蓄能力的时空变化

水系调蓄能力指单位面积可调蓄容量与单位面积槽容量之和,其大小受河流水位、长度、数目和面积等方面的影响。

2.1 不同时期水系总调蓄能力的变化

基于荆南三口水系结构的一些特征参数如河长、河流数目等^[18],再运用式(1)~(4)得到不同时期该研究区水系总体调蓄能力(表 2)。通过比较 1955 年、1978 年、1990 年、2008 年、2016 年 5 个不同时期的水系总调蓄能力,可以发现荆南三口地区水系总调蓄能力的各参数指标数值均呈逐期减小状态。其中,从 1955 年到 2016 年水系槽蓄容量 C 减少了 26.17%,而河网调蓄容量 A_c 减少了 47.59%。就年均减幅而言,水系的槽蓄容量和可调蓄容量在 1955—2016 年间年均减少量分别为 2499.51 万 m^3 和 2236.56 万 m^3 。水系单位面积槽蓄容量由 1955 年的 2.35 万 m^3/km^2 逐期减少到 2016 年的 1.74 万 m^3/km^2 ;水系单位面积可调蓄容量 A_{SR} 由 1955 年的 1.15 万 m^3/km^2 减少至 2016 年的 0.60 万 m^3/km^2 。从阶段性变化来看,与 1955 年比较, S_R 在 1956—1978 年、1979—1990 年、1991—2008 年、2009—2016 年 4 个阶段中的减少率分别为 0.28%、0.85%、0.23% 和 0.74%; A_{SR} 在这 4 个阶段中的减少率依次

为 1.41%、0.83%、0.26% 和 0.67%。从总体来看,三口地区水系天然调蓄能力呈减弱趋势,且 S_R 、 A_{SR} 在各阶段的递减率有所差异, S_R 在 1978—1990 年间减少最为显著, A_{SR} 在 1956—1978 年间下降得最为明显,随后减少率有所下降,且在 1990—2008 年间 S_R 、 A_{SR} 减小幅度远小于其他阶段。

表 2 不同时期三口地区水系总调蓄能力的变化

年份	$C/\text{万 m}^3$	$A_C/\text{万 m}^3$	$S_R/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	$A_{SR}/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$
1955	9 548.52	4 696.39	2.35	1.15
1978	8 904.06	3 097.64	2.19	0.76
1990	7 912.00	2 760.55	1.95	0.68
2008	7 556.38	2 621.36	1.86	0.64
2016	7 049.01	2 461.13	1.74	0.60

综上所述,荆南三口地区不同时期水系总调蓄能力均呈减弱趋势,这是由河流数量减少,水系发育趋向于主干化和单一化^[20]所致。如果河流水位处于上升状态,又在河道入流水量相同情况下,水系调蓄能力的下降则有可能增大该地区的洪涝灾害风险。

2.2 不同时期不同等级河道调蓄能力的演变特征

采用斯特拉勒 (Strahler) 法对河流进行分级^[21]将荆南三口地区河流分 5 个等级。在此基础上,运用式(1)和(2)计算该地区 1955 年、1978 年、1990 年、2008 年、2016 年 5 个时期所对应的不同等级河流的 C 和 A_C ,计算结果见表 3 和表 4。其中 1、2 和 3 级河流的槽蓄容量从 1955 年到 2016 年分别减少了 63.91%、26.32% 和 10.13%; 4 级河流和 5 级河流的槽蓄容量从 1955 年到 2016 年分别增加了 564.83 万 m^3 、173.47 万 m^3 。1、2 级和 3 级河流可调蓄容量从 1955 年到 2016 年分别减少了 409.08 万 m^3 、214.44 万 m^3 和 136.41 万 m^3 ; 4 和 5 级河流的可调蓄容量 1955—2016 年分别增加了 50.78 万 m^3 和 59.74 万 m^3 。上述分析表明,小河流(1、2 和 3 级河流)的调蓄能力下降最为明显,即河流等级越小其调蓄能力减小程度越大。这是由于大量河道较窄的小河流,在人类活动(修筑房屋,建设道路、田园化等)过程中被人为填埋,或消失,或成为断头河,或由于水利工程的修建,来水量减少,或断流,导致低等级河流消失。而骨干河道(4 级和 5 级河流)的调蓄能力在总体上呈上升趋势,且呈现先减少后增加的变化趋势,其主要原因与荆南三口地区近 60 多年来对骨干河道实施的疏浚、堵支强干、合支并流等治理工程密切相关。

由式(3)和(4)计算出荆南三口地区 5 个时期不同等级河流的 S_R 和 A_{SR} (图 2、图 3)。由图 2、图 3 可以看出,研究区域不同等级河道 S_R 和 A_{SR} 在不同

表 3 研究区不同等级河网槽蓄容量 万 m^3

等级	1955 年	1978 年	1990 年	2008 年	2016 年
1	586.80	459.40	359.40	277.00	211.76
2	922.79	864.03	834.03	729.22	679.91
3	2 369.41	2 143.00	2 143.00	1 875.35	1 749.52
4	2 610.30	2 710.30	2 829.14	2 924.37	3 175.13
5	3 159.21	3 057.34	3 157.34	3 200.46	3 332.69

表 4 研究区不同等级河网可调蓄容量 万 m^3

等级	1955 年	1978 年	1990 年	2008 年	2016 年
1	1 393.45	1 142.97	972.68	958.20	904.37
2	1 168.78	1 114.95	1 014.09	996.83	954.67
3	747.62	715.99	685.57	651.00	611.21
4	587.40	589.11	615.95	623.04	638.18
5	413.61	429.71	432.27	463.12	473.35

时期的变化幅度有较大差异。在 1955—2016 年间,以 5 级河流的 S_R 最大,1 级河流的 A_{SR} 最大。由此可见,骨干河流具有较大的蓄水功能,而低等级河流对于调蓄水量具有重要作用。4 级河流和 5 级河流 S_R 和 A_{SR} 基本保持不变,其间有小幅增长;1、2 和 3 级河流 S_R 和 A_{SR} 呈逐期减少趋势,特别是以低等级河流的 A_{SR} 减幅最明显。

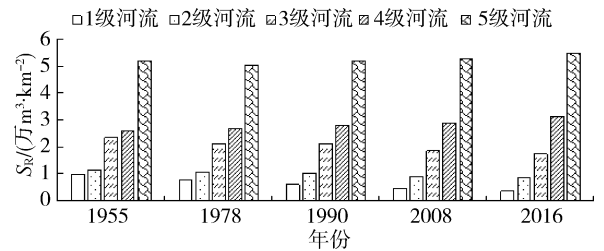


图 2 研究区不同等级不同时期水系单位面积槽蓄容量的差异及变化

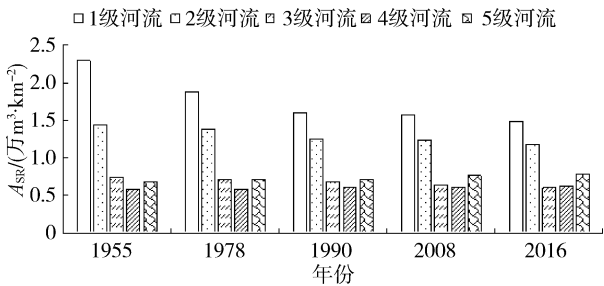


图 3 研究区不同等级不同时期水系单位面积可调蓄容量的差异及变化

河道狭窄且数目较多的 1 级和 2 级河流槽蓄容量下降幅度较大。这一结论充分表明,受人类剧烈活动(水利工程的修建、城镇用地扩张、修建道路等)的影响,大量细小河道被封堵或填埋,不断减少,导致该地区内的水系整体调蓄能力逐期下降。再以水系 S_R 和 A_{SR} 的变化速率为例,1 级河流在 1978—1990 年和 2008—2016 年的 S_R 变化速率明显高于 1956—1978 年和 1991—2008 年,其中 1978 年、1990 年、2008 年、2016 年分别减少 0.008 7 万 m^3/km^2 、0.012 6 万 m^3/km^2 、

0.0071 万 m³/km² 和 0.0119 万 m³/km²;4 级河流在 1978 年、1990 年、2008 年、2016 年的增长量为 0.004 1 万 m³/km²、0.009 0 万 m³/km²、0.004 9 万 m³/km² 和 0.027 5 万 m³/km²,在 1979—1990 年和 2009—2016 年这两个阶段 S_R 增加速度明显高于 1956—1978 年和 1991—2008 年。1956—2016 年,4 级和 5 级河流 A_{SR} 分别增加了 8.64% 和 14.44%;而 1 级、2 级和 3 级河流 A_{SR} 却分别减少 35.09%、18.31% 和 18.24%,4、5 级河流的 A_{SR} 一直呈上升趋势,但上升幅度不大,表明低等级河流的 A_{SR} 降幅相对较大,而高等级河流的 A_{SR} 降幅相对较小,这意味着荆南三口地区主干河流的调蓄能力有所增强,而河道较窄的低等级河流的调蓄能力在不断退化。

2.3 不同水系区河网调蓄能力的区域差异

通过式(1)~(4)计算分别得到 1955 年、1978 年、1990 年、2008 年、2016 年荆南 3 口地区三个水系片区的河网调蓄能力(表 5 和表 6)。由表 5 和表 6 可以发现,1955—2016 年各水系片区河网槽蓄能力均呈逐期下降态势,且各区系间的河网调蓄能力不尽相同。以 C 、 A_C 而言,在各个时期各水系区 C 与 A_C 均呈减少趋势。水系调蓄能力最大的是藕池河水系片区,调蓄能力退化最大的也是藕池河水系片区,1955—2016 年其 C 与 A_C 分别减少了 23.73%、34.6%;松滋河水系片区 C 与 A_C 分别减少了 21.58% 和 34.6%;虎渡河水系区 C 与 A_C 分别减少了 23.83% 和 23.73%。再以 S_R 、 A_{SR} 而论,在 1955 年、1978 年、1990 年、2008 年、2016 年 5 个时期中,该地区各水系片区河网 S_R 最强的是藕池水系片区,2016 年其 S_R 为 2.86 万 m³/km², A_{SR} 最强的也是藕池河水系片区,2016 年其 A_{SR} 为 1.05 万 m³/km²,明显高于其他水系区。而河网 S_R 和 A_{SR} 最低的是虎渡河水系片区,1955 年其 S_R 和 A_{SR} 分别为 3.36 万 m³/km² 和 1.16 万 m³/km²。此外,不同水系区片的调蓄能力退化速率也存在一定的差异,其中以藕池河水系的退化速率最快,1955—2016 年 S_R 减少了 1.15

万 m³/km²,递减速率为 28.72%, A_{SR} 减少 0.73 万 m³/km²,递减速率达 41.15%,明显快于其他两个水系区片。

3 水系结构与河网调蓄能力的关联性

水系(河网)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蓄水系统^[17]。这一概念强调了水系调蓄能力与水系结构、连通能力(其内部的河流数量、水力、河流长度、面积等河流的基本属性)密切相关。鉴于此,从水面率、河流等级、水系数量和河流结构等视角剖析荆南三口地区水系结构与河网调蓄能力之间的关联性,从而揭示水系结构、河流水文连通、水系连通度、水系连通性对河网调蓄能力强弱的影响程度。

3.1 水系结构与河网调蓄能力的相似性

为了分析水系结构与河网调蓄能力的空间变化相似性,将荆南三口地区各水系区片的水面率(W_p)和各水系区片的 C 、 A_C 、 S_R 和 A_{SR} 等参数作比较,得出水面率的高低分布地区与调蓄能力参数的大小分布地区(表 7)。由表 7 可知,松滋河水系区片与虎渡河水系区片的河网调蓄能力相对较弱,同时,这两个水系的水面率也相对较低;藕池河水系是水面率最高的水系区片,其对应的水系调蓄能力参数也明显大于其他水系区片,也就是说,相对较大的水面率、分维和河网自然度仍然反映了调蓄能力与河流结构之间的关联。这表明河网调蓄能力与河流结构的空间变化具有明显的相似性,河网调蓄能力与人类活动(水利工程)之间的逆变关系相对清晰,意味着水利工程对调蓄能力的影响大于对河流结构的影响。由此认为,水系结构与河网调蓄能力在空间变化上呈明显的相似性。

3.2 河流等级与河网蓄水能力的关系

为揭示河流等级与河网调蓄能力的关系,基于研究区不同等级河流的 S_R 和 A_{SR} (图 2,图 3),计算

表 5 研究区不同水系区片河网槽蓄容量及可调蓄容量 万 m³

水系区片	1955 年		1978 年		1990 年		2008 年		2016 年	
	C	A_C	C	A_C	C	A_C	C	A_C	C	A_C
松滋河	3 222.6	1 198.5	2 960.9	1 023.6	2 715.7	951.30	2 629.70	793.30	2 526.9	783.8
虎渡河	2 526.8	821.4	2 395.1	767.3	2 155.1	700.71	2 023.31	670.91	1 924.6	626.4
藕池河	3 799.3	1 684.0	3 548.0	1 406.8	3 241.2	1 245.50	3 103.40	1 057.10	2 897.4	990.9

表 6 研究区不同水系区片河网单位面积槽蓄容量及单位面积可调蓄容量 万 m³/km²

水系区片	1955 年		1978 年		1990 年		2008 年		2016 年	
	S_R	A_{SR}	S_R	A_{SR}	S_R	A_{SR}	S_R	A_{SR}	S_R	A_{SR}
松滋河	3.41	1.27	3.13	1.05	2.87	1.01	2.78	0.84	2.67	0.89
虎渡河	3.36	1.16	3.37	1.08	3.04	0.99	2.85	0.94	2.74	0.88
藕池河	4.01	1.78	3.74	1.48	3.42	1.31	3.27	1.12	2.86	1.05

表 7 荆南三口地区不同水系区片的调蓄效应

水系区片	年份	$W_p/\%$	$C/\text{万 m}^3$	$A_C/\text{万 m}^3$	$S_R/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	$A_{SR}/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$
松滋河	1955	18.19	3 222.48	1 198.5	3.41	1.27
	1978	17.06	2 960.97	1 023.58	3.13	1.05
	1990	16.22	2 715.71	951.32	2.87	1.01
	2008	15.46	2 629.71	793.32	2.78	0.84
	2016	15.43	2 526.96	783.81	2.67	0.89
虎渡河	1955	15.54	2 526.78	821.38	3.36	1.16
	1978	14.98	2 395.07	767.26	3.37	1.08
	1990	13.43	2 155.08	700.73	13.43	0.99
	2008	12.98	2 023.31	670.93	2.85	0.94
	2016	12.67	1 924.61	626.41	2.74	0.88
藕池河	1955	20.38	3 799.27	1 684.02	4.01	1.78
	1978	19.67	3 548.02	1 406.81	3.74	1.48
	1990	18.54	3 241.21	1 245.5	3.42	1.31
	2008	17.57	3 103.37	1 057.12	3.27	1.12
	2016	17.35	2 897.44	990.92	2.86	1.05

其比值(图 4)。荆南三口地区不同等级河流 S_R 与 A_{SR} 的比值关系表明,该比值是随着河流等级的增大而不断增大,即河流等级越大,比值越大,也就是说,河流 S_R 相对于 A_{SR} 而言数值越大,河流的蓄水能力越强。1、2 级河流该比值都小于 1,说明这两个等级河流的 S_R 都小于 A_{SR} ,其调蓄能力较强。3、4 和 5 级河流 S_R 、 A_{SR} 比值都大于 1,等级越高,比值越大,说明其蓄水能力越强,较小河流具有很强的调蓄能力,而主干河流具有很强的槽蓄能力,低等级河流调节功能显著,而且低等级河流的数量和结构对河网调蓄能力的影响更大。由此进一步验证了河流结构对河网调蓄能力的影响。同时也说明了要提高河网调蓄能力,不仅要规划和保持一定的水面率,还要优化和修复河网结构,维护河流自然的等级发育规律。

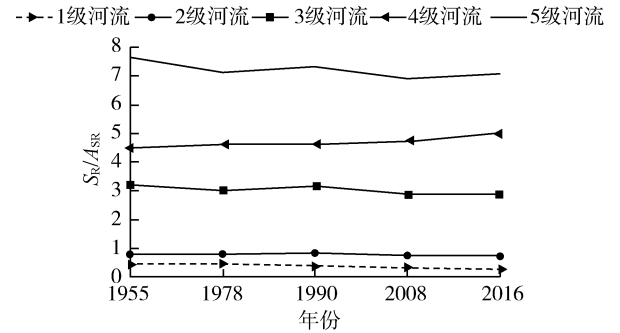


图 4 不同等级河流 S_R 与 A_{SR} 的比值关系

3.3 水系数量、河流结构与河网调蓄能力的关系

为系统分析水系数量、河流结构与河网调蓄能力的关联性,选取松滋河、虎渡河和藕池河 3 水系区片的水系结构指标数据、槽蓄能力指标数据和可调蓄能力指标数据,提取其对应年份及区片的水系结构参数与调蓄能力参数,并在 SPSS 软件中用 Pearson 法对提取的数据进行相关性分析,分析结果

见表 8。由表 8 可知,荆南三口地区河网调蓄能力与 W_p 呈高度正相关关系,其相关系数都高于 0.995,这表明河网调蓄能力大小与水面率大小密切相关,同时调蓄能力还与发育系数 K 、河网复杂度 C_R 、分维数 D 、河网密度 D_R 相关,这反映出水系结构决定了调蓄能力的大小,即 D 值越大, W_p 越高, K 越大,所对应的河网调蓄能力也就越强。1955—2016 年荆南三口地区修建水闸、矮围灭螺、堤垸合并、田园化、渠系化、平垸行洪、退田还湖等各种水利工程和下荆江裁弯取直工程,天然水系结构遭受破坏,使水系结构向单一化方向发展,这正是导致该地区河网整体调蓄能力下降的症结所在。

表 8 河网调蓄能力指标和水系结构指标间的相关系数

指标	W_p	D_R	K	C_R	D
C	0.995 **	0.466	0.891 **	0.736 *	0.895 **
A_C	0.997 **	0.494	0.991 **	0.801 **	0.919 **

注: ** 表示在 0.01 水平上显著相关; * 表示在 0.05 水平上显著相关,下同。

4 水系连通性变化与河网调蓄能力的关联性

4.1 水力连通性与河网调蓄能力的关系

为分析水力连通性与河网调蓄能力的关系,选取松滋河系区、虎渡河系区和藕池河系区 1955 年、1978 年、1990 年、2008 年、2016 年 5 个时期的水文连通参数和槽蓄能力参数和可调蓄能力参数,提取其对应年份及各水系区的水文连通参数与调蓄能力参数,在 SPSS 软件中用 Pearson 法对提取的数据进行相关性分析,分析结果见表 9。由表 9 可知,河网 S_R 与 A_{SR} 与水文连通性的相关系数均在 0.01 以上,且都为正数,即水文连通与 S_R 和 A_{SR} 水平呈显著正相关,这意味着两水位站点之间的水力连通值越高,所对应的河网调蓄能力越强。

表 9 河网调蓄能力指标和水文连通指标间的相关系数				
指标	水文连通性			
	新江口-沙道观	沙道观-弥陀寺	弥陀寺-康家岗	康家岗-管家铺
S_R	0.982 **	0.651 *	0.858 *	0.763 *
A_{SR}	0.824 **	0.991 **	0.996 **	0.970 **

4.2 水系连通度、连通性与河网调蓄能力的关系

为分析水系连通度、连通性与河网调蓄能力的关系,选取松滋河、虎渡河和藕池河 3 区系的水系连通度指标值、连通性指标值、槽蓄能力指标值、可调蓄能力指标值,提取其对应年份及区系的水系连通度、连通性参数、槽蓄能力参数、可调蓄能力参数,在 SPASS 软件中用 Pearson 法对提取的数据进行相关性分析,分析结果见表 10。由表 10 可知,荆南三口地区的河网调蓄能力与水系连通环度 α 、水系连通度 γ 、水系连通性 E 和水系连通性 F 均在 0.01 水平上呈显著正相关,且与河网节点连接率(β) 在 0.05 水平上显著正相关,表明水系连通度和水系连通性与河网调蓄能力关系密切,即河网调蓄能力受水系连通的影响显著,水系连通环度、水系连通度、水系连通性 E 和水系连通性 F 值越高,河网调蓄能力就越强。

表 10 河网调蓄能力指标和水系连通指标间的相关系数					
指标	α	E	β	F	γ
A_{SR}	0.91 **	0.96 **	0.582 *	0.98 **	0.88 **
S_R	0.95 **	0.98 **	0.65 *	0.97 **	0.89 **

综上所述,该地区在以水利工程为代表的人类活动下的水系结构变化,引起了河网调蓄能力的变化,特别是水系连通性变化对河网调蓄能力的影响更为显著。由此可以认为,在不影响现有三口水系及江湖关系格局的前提下,一是结合疏浚河道、全面封堵交叉串河、“堵”支并流、“塞”支强干等工程措施优化水系结构;二是利用水闸改建、开闸引水、开挖新河调水等工程措施,提高各河流的蓄水能力;三是疏挖枯水深槽,因势利导兴修藕池河中西支平原水库、虎渡河下游平原水库,与此同时,优化三峡水库调度方案,加大水库汛末蓄水期的下泄水量,从整体上增加三口河道的径流量,缩短河流断流时间。通过这些措施沟通河流、湖泊、湿地等水体,形成引排顺畅、蓄泄协调、丰枯调剂、多源互补、可调可控的河湖水系格局,最大限度地增强河湖水系的水力连通程度,进而提高荆南三口地区的河网调蓄能力。

5 结论与讨论

a. 河网总体调蓄能力呈逐期缩减趋势。河网调蓄能力的衰减,在河道入流水量相同的情况下,一

方面在丰水期河网水位上升,增大洪涝风险;另一方面在枯水期河网水位下,则增大旱情风险。

b. 不同等级河流的调蓄能力具有差异性,其中以 1 级、2 级和 3 级河流调蓄能力各指标参数减少最为明显,而 4 级和 5 级河流的调蓄能力各指标参数减少值相对较低,河网 S_R 和 A_{SR} 具有明显的等级差异, A_{SR} 以低等级河流(1、2、3 级)减少幅度最大。

c. 各水系区河网槽蓄能力和可调蓄能力均呈逐期减弱态势,其中以藕池河水系区衰退最显著,藕池水系片区的 S_R 和 A_{SR} 最强,但缩减程度较大;虎渡河水系区的 S_R 和 A_{SR} 较弱。

d. 河网调蓄能力大小与发育系数、河网复杂度和分维数相关。水力连通与 S_R 和 A_{SR} 呈显著正相关,水系连通环度、水系连通度、水系连通性 E 和水系连通性 F 值越高,区域河网调蓄能力就越强,表明水系结构、河流水文连通、水系连通度、水系连通性对河网调蓄能力强弱的变化起着决定性作用。为保证该地区各水系区的河网调蓄能力不下降或者降低其下降速度,一方面要保护现有河道,尊重河网自然等级的发育规律,维持区域内水面率的稳定状态;另一方面结合农田水利与城镇化建设实施河湖水系连通工程,逐渐恢复水系结构功能与其调蓄能力。

e. 平原河网地区水系形态结构,如水面率、河面率、分支比等与 S_R 、 A_{SR} 等参数具有显著的关联性。因此,应从保护河网水系结构和功能及提高水系调蓄能力的角度考虑荆南三口平原河网地区的平均水面率、平均河面率应保持的百分比。平原河网地区河流时空关系复杂,如何建立更合理的平原河网地区的河流分类系统,如何通过实测、模拟和历史资料的系统分析,探讨具有不同等级河流结构的河网调蓄能力。同时,三口河网属高强度人类活动区域,如何调控人类活动方式对水系结构与功能变化的影响,这些均是值得今后进一步探讨的问题。

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. (NI Jinren, LIU Yuan yuan. Ecological rehabilitation of damaged river system [J]. Science & Technology Review, 2006, 24 (7): 17-20. (in Chinese))

[2] 李原园,郦建强,李宗礼,等. 河湖水系连通研究的若干问题与挑战[J]. 资源科学,2011,33(3):386-391. (LI Yuan yuan, LI Jian qiang, LI Zong li, et al. Issues and challenges for the study of the interconnectedriver system network[J]. Resources Science, 2011, 33 (3): 386-391. (in Chinese))

[3] 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. (HAN Longfei, XU Youpeng, YANG Liu, et al. Temporal and spatial change of stream structure in Yangtze River Delta and its driving forces during 1960s—2010s[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(5): 819-827. (in Chinese))
- [4] 王腊春, 许有鹏, 周寅康, 等. 太湖水网地区河网调蓄能力分析[J]. 南京大学学报(自然科学), 1999, 35(6): 712 -718. (WANG Lachun, XU Youpeng, ZHOU Yinkang, et al. Analysis of the storage capacity of river network in Taihu watershed [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 1999, 35 (6): 712-718. (in Chinese))
- [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): 717-729. (YUAN Wen, YANG Kai, TANG Min, et al. Stream structure characteristics and their impact on storage and flood control capacity in the urbanized plain river network [J]. Geographical Research, 2005, 24 (5): 717-729. (in Chinese))
- [6] 金卫斌, 刘章勇. 围湖垦殖对湖泊调蓄功能的累加效应分析[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(1): 74-76. (JIN Weibin, LIU Zhangyong. Cumulative effect of lake reclamation upon the flood storing in Changhu and Honghu lakes [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2003, 12(1): 74-76. (in Chinese))
- [7] 王慧玲, 梁杏. 洞庭湖调蓄作用分析[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(3): 64-66. (WANG Huiling, LIANG Xing. Analysis on flood storage function of the Dongting Lake[J]. Geography and Geo-information Science, 2003, 19(3): 64-66. (in Chinese))
- [8] 毛锐. 建国以来太湖流域三次大洪水的比较及对今后治理洪涝的意见[J]. 湖泊科学, 2000, 12(1): 12-18. (MAO Rui. Comparison of three heavy floods since 1949 in Taihu Lake basin and some suggestions on flood control in future[J]. Journal of Lake Sciences, 2000, 12(1): 12-18. (in Chinese))
- [9] 王学雷, WILLIAM A G, 吴宜进. 江汉平原典型区域洪涝调蓄能力估算研究[J]. 武汉大学学报(理科版), 2002, 48(4): 461-465. (WANG Xuelei, WILLIAM A G, WU Yijin. The estimating study of the storage capacity of the typical region in Jiangnan Plain[J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2002, 48 (4): 461-465. (in Chinese))
- [10] 许有鹏, 葛小平, 张立峰, 等. 东南沿海中小流域平原区洪水淹没模拟[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 38 - 45. (XU Youpeng, GE Xiaoping, ZHANG Lifeng, et al. Research of flood inundated simulation on floodplain in coastal medium and small basins of Southeast China[J]. Geographical Research, 2005, 24 (1): 38-45. (in Chinese))
- [11] 王腊春, 许有鹏, 周寅康, 等. 太湖水网地区河网调蓄能力分析[J]. 南京大学学报(自然科学), 1999, 35(6): 712-718. (WANG Lachun, XU Youpeng, ZHOU Yinkang, et al. Analysis of the storage capacity of river network in Taihu watershed [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 1999, 35 (6): 712-718. (in Chinese))
- [12] 王洪梅. 基于 SOBEK 的水量水质模型在松花江流域的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [13] 谷晓伟. 基于 SOBEK 模型的黄河三角洲自然保护区淡水湿地生态需水量研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [14] DANIEL J T, ERIK D, FIRMIJN Z, et al. Coupled1D-3D hydrodynamic modelling with application to the Pearl River Delta[J]. Ocean Dynamics, 2009, 59: 1077- 1093.
- [15] 于丹丹, 杨波, 李景保, 等. 近 61 年来长江荆南三口水系结构演变特征及其驱动因素[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(4): 13-20. (YU Dandan, YANG Bo, LI Jingbao, et al. Analysis on the evolution characteristics and driving factors of the Jingnan Three Port river structure of Yangtze River in recent 61 years [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2017, 28 (4): 13-20. (in Chinese))
- [16] 李景保, 钟一苇, 周永强, 等. 三峡水库运行对洞庭湖北部地区水资源开发利用的影响[J]. 自然资源学报, 2013, 28(9): 1583-1593. (LI Jingbao, ZHONG Yiwei, ZHOU Yongqiang, et al. Impacts of the operation of Three Gorges Reservoir on the development and utilization of water resources of Northern Dongting Lake area [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28 (9): 1583-1593. (in Chinese))
- [17] 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. Temporal evolution of dried up days and the influencing mechanisms at three outlets along Jingjiang in the middle reach of Yangtze River [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31 (10): 1713-1725. (in Chinese))
- [18] 张需琴, 李景保, 李忠武. 三峡水库运行下荆南三口地区水环境承载力研究[J]. 水资源保护, 2017, 33(6): 133-142. (ZHANG Xuqin, LI Jingbao, LI Zhongwu. Research on water environment carrying capacity of Three Diversion of Jingjiang River under operation of Three Gorges Reservoir [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (6): 133-142. (in Chinese))
- [19] 于丹丹. 长江荆南三口水系结构演变特征及其对调蓄能力的影响[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2017.
- [20] 徐光来, 许有鹏, 杨柳, 等. 基于水流阻力与图论的河网连通性评价[J]. 水科学进展, 2012, 23(6): 776-781. (XU Guanglai, XU Youpeng, YANG Liu, et al. Evaluation of river network connectivity based on hydraulic resistance and graph theory [J]. Advances in Water Science, 2012, 23 (6): 776-781. (in Chinese))
- [21] WAINWRIGHT J, TURNBULL L, IBRAHIM T G, et al. Linking environmental regimes, space and time: interpretations of structural and functional connectivity [J]. Geomorphology, 2011, 124 (3): 387-404

(收稿日期: 2018-12-02 编辑: 彭桃英)