

DOI:10.12170/20190627001

贾雅兰,施勇. 基于MLP方法的长江-洞庭湖江湖水沙交换演变规律研究[J]. 水利水运工程学报, 2020(5): 24-32. (JIA Yalan, SHI Yong. Preliminary study on evolutions of Yangtze River and Dongting Lake water and sediment fluxes exchanges based on MLP method[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(5): 24-32. (in Chinese))

基于MLP方法的长江-洞庭湖江湖水沙交换 演变规律研究

贾雅兰,施勇

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 基于多层感知机MLP(Multi-layers Perceptrons)方法建立了长江和洞庭湖水沙交换关键节点间的回归关系,计算并分析江湖水沙交换各节点的联动变化。研究结果如下:(1)城汉河段(城陵矶-汉口)的河床冲淤及水情变化是江湖水沙通量演变的重要环节,分析下荆江裁弯后三口和干流水沙通量的变化可知,城汉河段淤积严重导致荆江水沙下泄受阻;(2)三峡水库运用后,荆江河段上下游间、主支汊间的水沙联系减弱明显;(3)当汉口水位高于26 m时,汉口水位每抬升1 m对应的螺山流量增量基本稳定,该值在调弦口建闸前后、裁弯后、葛洲坝截流后和三峡水库运用后分别为4 400, 4 300, 4 500~4 700和4 000 m³/s;(4)荆江三口水沙分泄能力对宜昌站来水量的响应程度逐渐减弱,在三峡水库运用前各时段内,三口水沙分泄能力对来水量的响应程度在汛期宜昌站流量站流量为35 000 m³/s时最强,三峡水库运用后,则是在汛前和汛后宜昌站流量为25 000 m³/s时最强。

关键词: 江湖水沙通量;水沙关系;荆江口;分流分沙;三峡工程

中图分类号: TV142

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2020)05-0024-09

荆江河段的特殊性,既在于其面临巨量洪水的严峻压力,也在于其两岸地区的经济和社会发展,近百年来诸多江湖整治工程等人类活动意在为长江中游地区的洪水寻求出路(图1为荆江-洞庭湖河系示意图)。近些年来,以三峡工程为代表的上游控制性水利枢纽相继建成与运用,引起的江湖关系调整和对两湖的影响,愈发受到社会各界的关注。近60年来江湖水沙交换规律的研究主要集中在荆江三口分流分沙的变化、洞庭湖出湖水情的变化以及长江-洞庭湖的顶托关系等方面。长期以来,荆江三口分流比呈递减趋势,递减率以下荆江系统裁弯期间最大,三口洪道年断流天数也逐渐增多,秋冬季节水量不断减少^[1-5];对三峡水库蓄水后荆江三口分流发展的趋势归纳及预测存在一定分歧,主要结论以三口洪道淤积萎缩,三口分流比下降居多^[3,6-8],部分则认为荆江三口分流比会略有增大^[9],或是维持当前水平^[10]。长期以来洞庭湖排沙比有增大的趋势,排沙比随入湖径流量的增加而增大,随入湖输沙量的增加而减小,随出口水位的增加而减小,其中入湖输沙量的影响最大,故汛期排沙比小,非汛期排沙比很大^[11]。相比于三峡水库运行前(1993—2002年),2003—2010年城陵矶年平均水位下降0.54 m,枯季水位下降更显著,长江干流水文特征变化是城陵矶水位下降的主导因素^[12-13]。在长江-洞庭湖顶托关系的定量研究上,李振林等以1996年资料为例分析得出:监利站水位35 m时(冻结高程,下同),洞庭湖顶托对下荆江泄洪的影响为七里山水位每抬高1 m,监利站流量平均减少8 800 m³/s;监利站水位38 m时,七里山水位每抬高1 m,监利站流量平均减少13 000 m³/s^[14]。王冬等推算出三峡水库在蓄水期间(10月)日均蓄水量为5 000 m³/s时,城陵矶水位相比天然情况下下降1.64 m,入湖水量减少24.23亿m³,城陵矶出流量增加16.77亿m³^[15-16]。

目前有关江湖水沙交换关系、江湖水沙演变规律的研究,多以江湖衔接处的某一环节进行深入分析,而

收稿日期: 2019-06-27

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0405301);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(Y520012)

作者简介: 贾雅兰(1992—),女,云南文山人,硕士研究生,主要从事江湖水沙关系演变研究。E-mail: jiayalan@sina.com

对于各衔接处的相互关系及联动过程研究较少。虽已有研究指出城汉河段(城陵矶-汉口)冲淤及水情变化对长江中游及洞庭湖区防洪的重要性^[17], 但江湖水沙关系研究中仍大部分以荆江三口分流分沙、洞庭湖入出湖水沙变化为主要切入点, 而以城汉河段的水情变化和江湖水沙关系重要环节而展开的研究较少。本文着重研究城汉河段水情变化对江湖水沙交换的联动效应, 将近 60 年的水文系列划分为以下 4 个时段: 调弦口建闸后、下荆江裁弯完成后、葛洲坝截流后和三峡水库蓄水运用后(表 1 为下荆江裁弯完成后、葛洲坝截流后和三峡水库蓄水运用后宜昌至汉口河段平滩河槽年均冲淤强度), 采用人工神经网络之多层感知机 MLP 的方法建立汉口站水位与江湖水沙交换关键节点处的回归关系, 计算并分析江湖水沙交换关键节点处响应关系的变化, 揭示各时段江湖水沙交换的演变规律及影响因素, 为长江中游防洪格局及洪涝治理等问题提供新的研究思路。

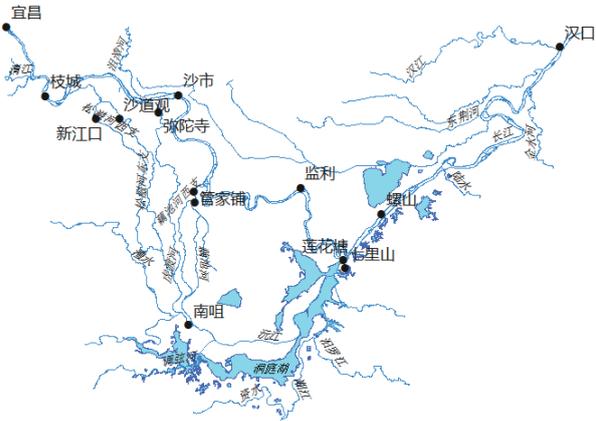


图 1 荆江-洞庭湖河系示意

Fig. 1 Jingjiang River and Dongting Lake system

表 1 不同时期宜昌至汉口河段年平滩河槽冲淤强度
Tab. 1 Intensity of sediment and scour in Yichang-Hankou reach at different stages

河段名称	河段长度/km	年平滩河槽冲淤强度/(10 ⁴ m ³ ·(km·a) ⁻¹)		
		1966—1981年	1982—2002年	2003—2016年
宜枝	60.8	-6.9	-6.4	-18.3
上荆江	171.7	-5.6	-7.4	-23.3
下荆江	175.5	-7.7	3.3	-15.4
荆江	347.2	-6.6	-2.0	-19.3
城汉	251.0	3.0	1.4	-11.2

1 研究方法

考虑到本文中涉及的回归分析较多且时间跨度较长、江湖关系受外部影响较大, 若仅采用固定的一类或几类函数进行拟合, 不但效果欠佳, 而且无法达到定量分析的目的, 故选用机器学习中能够处理非线性不可分问题、生成光滑回归线的人工神经网络之多层感知机 MLP 方法对近 60 年来长江中游江湖关系关键节点(沙市站、监利站、螺山站、汉口站及三口五站、湖区南咀站、七里山站)的水文资料进行回归分析。

建立人工神经网络模型的 3 个关键要素是: 人工神经元的数学模型、人工神经网络的拓扑结构和人工神经网络的学习训练算法。本文采用非线性函数中的双曲正切函数(tanh 函数)(式 (1)), 是 Sigmoid 函数的变形, 解决了 Sigmoid 均值非零的问题。神经元之间传递的权重信息, 采用 L-BFGS(Large BFGS, 拟牛顿法的一种)权重优化算法, 该方法收敛速度较 SDG(Stochastic Gradient Descent)和 Adam(Adaptive Moment Estimation)更快, 其他参数的调整也更为容易。正则化项采用的是 L2 范数(Ridge Regression), 即欧氏距离(式 (2)), 不仅可以避免过拟合, 还使优化求解变得稳定与迅速。

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (1)$$

$$\|x_2\| = \sqrt{\sum_{i=0}^n |x_i|^2} \quad (2)$$

本文研究涉及 1956—2016 年 61 年的逐日水文资料, 以江湖系统的整体环境和局部人类活动变化为线索, 将研究时段划分为调弦口建闸后(1959—1968 年)、下荆江系统裁弯完成后(1973—1980 年)、葛洲坝截流后(1981—2002 年)、三峡水库运用后(2003—2016 年)几个时段, 每个时段内随机取 80% 的点据作为训

练集、20% 作为验证集, 不断调整选取的训练集和模型的非线性隐藏层数量(为保证计算速度和精度, 控制在 2~10 层), 确保验证集的判定系数 R^2 在 0.8 以上(其中在葛洲坝截流后和三峡水库蓄水运用后南咀水位与三口输沙率相关系数由 19 世纪 80 年代之前的 0.92 分别降至 0.85 和 0.79, 直接影响到回归关系的拟合效果, 因此其判定系数仅分别为 0.733 和 0.684), 分别建立汉口站水位与螺山站流量、螺山站流量与城陵矶水位、城陵矶水位与南咀水位、南咀站水位与荆江三口输沙率、荆江三口与监利站输沙率、监利与沙市站输沙率的回归线, 判定系数见表 2, 通过其相互之间的关系, 将江湖水沙交换的各关键环节连接起来。其中, 输沙率值跨度较大, 在处理时皆取其数值进行拟合, 采用对数坐标。

表 2 各时段江湖水沙交换关键节点回归关系判定系数

Tab. 2 Coefficients of determination for regression relationships of key nodes in water and sediment exchange in Yangtze River and Dongting Lake in each period

节点及关系	调弦口建闸前/后	下荆江裁弯完成后	葛洲坝截流后	三峡水库蓄水运用后
Z汉口-Q螺山	0.979/0.969	0.969	0.973	0.964
Q螺山-Z城陵矶	0.975/0.976	0.986	0.988	0.992
Z城陵矶-Z南咀	0.936/0.927	0.923	0.938	0.907
Z南咀-S三口	0.867/0.859	0.807	0.733	0.684
S三口-S监利	0.900/0.857	0.921	0.923	0.816
S监利-S沙市	0.888/0.910	0.944	0.943	0.828
Q宜昌-S三口	0.951/0.974	0.972	0.841	0.833
Q宜昌-S监利	0.924/0.905	0.897	0.907	0.804
Q宜昌-S沙市	0.889/0.925	0.943	0.915	0.812

2 江湖水沙交换关键节点间的对应关系

图 2~4 为利用 MLP 方法建立的不同汉口站水位下江湖水沙交换关键节点处的回归关系图。从图 2 汉口水位与螺山站流量的关系看, 整体上两者关系变化不大, 相对突出的变化出现在调弦口建闸后、下荆江系统裁弯完成后及三峡水库蓄水运用后。调弦口建闸后, 江湖汇流区干流域螺河段略有淤积, 但城汉河段整体上略有冲刷, 因此在汉口站水位较低(低于 18 m)时, 螺山站流量较堵口前略有减小, 但随着汉口站水位的升高, 水面比降较调弦口建闸前加大, 城螺河段向下游泄洪的能力随之增强, 螺山站流量较建闸前增加。

下荆江系统裁弯后, 下荆江河床溯源冲刷, 水面比降加大, 输沙率加大, 城汉河段泥沙淤积量增加, 使得汉口站各水位级下对应的螺山站流量较裁弯开始前皆有所减小, 减小值随汉口站水位的抬升而加大; 相同汉口站水位下, 该河段的泄流能力较裁弯前有所减弱。

三峡水库蓄水运用后城汉河段河床由淤转冲, 冲刷主要集中在枯水河槽, 故当汉口站水位低于 18 m 时, 三峡水库运用后螺山站流量较之前有明显增加, 增幅随汉口站水位的升高而加大, 当汉口水位在 18~23 m 时, 螺山站流量仍较建库前有所增加, 但增幅却随汉口水位的升高而减小。当汉口水位高于 23 m 时, 螺山站流量较建库前开始出现显著减小趋势, 且减小值随汉口水位的升高逐渐加大。上述低水期流量增加、中高水期流量反而减少的现象是三峡水库运行初期城汉河段河道向深窄化发展的反映, 平滩河槽以上冲刷很小甚至有可能为淤积; 另外, 三峡水库运用后长江中下游支流对干流的影响相对增强, 汉口站受汉江来流汇入的影响加剧, 加之下游顶托洪水宣泄不畅等, 使汛期水位抬升幅度加大(如 2010 年后汉口和螺山站汛期

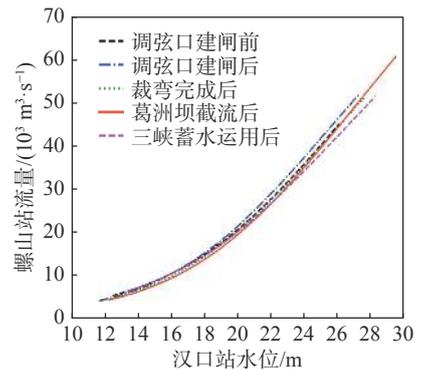


图 2 汉口水位与螺山站流量关系

Fig. 2 Regression relationships between the water-level of Hankou and the flow of Luoshan

常出现高洪水位),影响螺山站水沙下泄。

从图3螺山流量与城陵矶水位的关系变化上看,在相同螺山站流量下,城陵矶水位整体上呈逐渐抬升的趋势。与调弦口建闸前相比,建闸后当螺山流量低于 $10\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,城陵矶水位较建闸前的抬升幅度随螺山流量的升高而减少;当螺山流量高于 $25\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,城陵矶水位的抬升幅度则随螺山流量的升高而增加。至下荆江系统裁弯完成后,洞庭湖湖床持续淤积,城陵矶水位明显抬升,抬升幅度在 $0.6\ \text{m}$ 以上,枯、高水期水位抬升更为显著,江湖汇流区城陵河段水面比降趋平,相互顶托作用加强,进一步减弱了江湖汇流区的泄洪能力。葛洲坝截流前后城陵矶水位的抬升幅度比下荆江系统裁弯前后要小,因城汉河段在这一时期的淤积量减小,城陵矶水位抬升趋势有所放缓。三峡工程运用后,尽管水库枯季补水,但次饱和水流进入洞庭湖区后使得泥沙沉积减少,非汛期湖床冲刷现象更为显著,故综合分析螺山流量低于 $20\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时城陵矶水位较建库前略有下降;汛期干流水流对洞庭湖的顶托进一步增强,当螺山流量大于 $20\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,城陵矶水位抬升,抬升幅度随螺山流量的升高而增加。

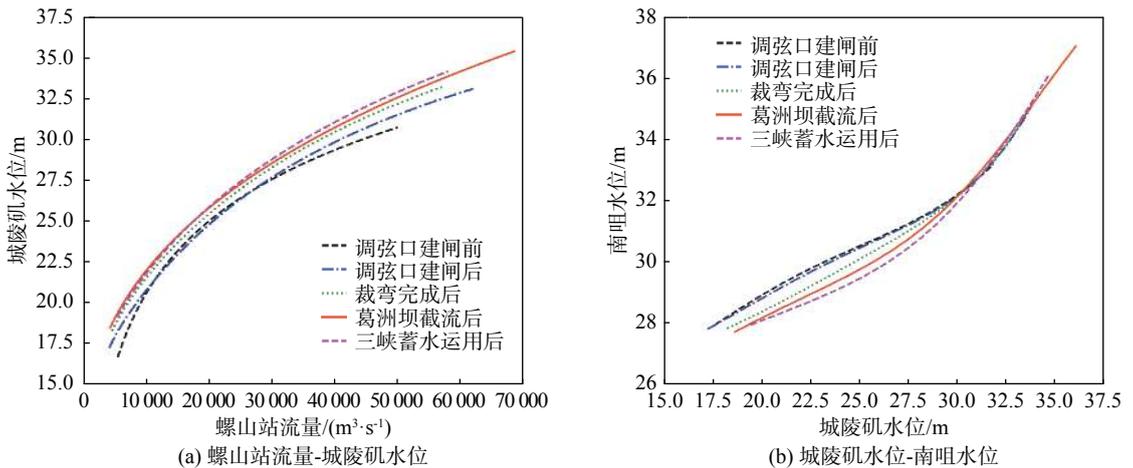


图3 螺山站流量与城陵矶水位、城陵矶水位与南咀水位的关系变化

Fig. 3 Regression relationships between the flow of Luoshan and the water-level of Chenlingji and between the water-level of Chenlingji and Nanzui

从图3城陵矶水位与南咀水位的关系变化上看,调弦口建闸前后南咀水位变化不大。城陵矶水位在 $30\ \text{m}$ 以下时,下荆江裁弯后和葛洲坝截流后南咀水位都较其前一时段的有所下降,其中在城陵矶水位低于 $25\ \text{m}$ 时,葛洲坝截流前后南咀水位的下降幅度与裁弯前后相比减少,主要是因荆江三口输沙率急剧减少的趋势有所放缓。截流后至三峡水库运用前,汛期洞庭湖泥沙沉积率最大,当城陵矶水位高于 $30\ \text{m}$ 时,南咀水位明显抬升。三峡水库运用后受三口口门、三口入湖河道和湖区湖床冲刷的影响,南咀水位下降,降低幅度随城陵矶水位呈先增后减的趋势,枯季三口分流能力增强。综合河床冲刷和分流量增加的影响,城陵矶水位低于 $20\ \text{m}$ 时南咀水位变化不大;洪水期城陵矶水位高于 $33\ \text{m}$ 时,南咀水位较建库前抬升。

从图4南咀水位与荆江三口、三口与监利、监利与沙市输沙率的关系变化上看。调弦口建闸后三口输沙率减少,减幅随南咀水位先减后增,在南咀水位为 $31\ \text{m}$ 左右时减幅最小仅约 10% ;建闸后调弦口基本不再分流,当三口分泄水沙与建闸前相同时,下荆江监利站下泄输沙率增加,增幅随三口输沙率的增加而增加;监利输沙率在 $50\ 000\ \text{kg}/\text{s}$ 以下时,建闸前后对应的沙市输沙率变化相对较小,当监利输沙率大于 $50\ 000\ \text{kg}/\text{s}$ 时,沙市输沙率较建闸前增加。下荆江裁弯工程增加下荆江水沙分泄的能力,加速减小了三口的输沙率,如南咀水位为 $31\ \text{m}$ 时,三口输沙率较裁弯前减少约达 50% ,且当三口输沙率较小时,监利输沙率增加幅度更为显著;同时,由于下荆江冲刷最为剧烈,相同监利输沙率对应的沙市输沙率较裁弯前基本减少,监利输沙率大于 $30\ 000\ \text{kg}/\text{s}$ 时更为显著,减幅随监利输沙率的增大而增加,当监利输沙率达 $100\ 000\ \text{kg}/\text{s}$

以上时,沙市输沙率减幅在 50% 以上。葛洲坝截流后三口输沙率较截流前总体上仍呈减少趋势,枯水期减少得更显著,但总体上减幅不及裁弯后,驱动机制也与裁弯完成前后有所不同。裁弯引起的三口水沙通量减小主要是因下荆江河段水面比降增大、干流河床冲刷剧烈所致,而葛洲坝截流后同一监利输沙率下沙市输沙率略有减少,尤其是在中枯水期监利输沙率小于 10 000 kg/s 时,沙市输沙率减少得较明显,即上游来流含沙量降低,三口水沙通量的减小与葛洲坝拦截一定量泥沙、来沙量减少有较大关系,同时,作为三角洲上河道,三口河道的淤积仍在进一步影响其水沙分泄能力。

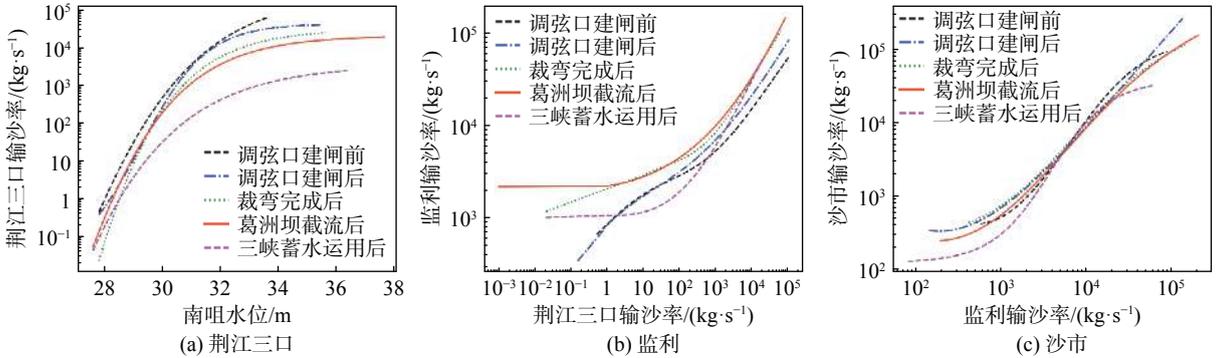


图 4 荆江三口、监利和沙市输沙率关系

Fig. 4 Regression relationships among sediment fluxes of the three outlets, Jianli and Shashi

三峡水库蓄水运用后,在相同汉口站水位时,三口、监利和沙市站的输沙率较建库前皆呈大幅减少,最主要的原因是三峡水库蓄水后清水下泄,坝下游水流含沙量骤减。需要指出的是,低、高水期荆江河段受低含沙量水流的沿程补沙作用较为显著,如监利输沙率在 5 000 kg/s 以下和 50 000 kg/s 以上时,对应的沙市输沙率都较建库前减少 30% 以上;三峡水库的调蓄作用改变天然水流的年内分配过程,支流来水来沙对干流的影响相对加强,因此荆江河段上下游间、主支汊间的水沙联系相对减弱,三口与监利站、监利站与沙市站输沙率的相关性皆较建库前明显降低,其中,三口与监利输沙率的相关系数由 0.962 降至 0.906,监利与沙市输沙率更是由 0.960 降至 0.824。

3 江湖水沙交换关键节点间的响应关系

图 5(a)为近 60 年来各研究时段内不同汉口水位级别下,汉口水位每抬升 1 m 对应的螺山流量增量值 $\Delta Q_{\text{螺山}}$ 变化情况:当汉口水位低于 25 m 时, $\Delta Q_{\text{螺山}}$ 随汉口水位上升而增加;至汉口水位升至 26 m 以上时, $\Delta Q_{\text{螺山}}$ 基本达到一稳定值,调弦口堵口前后该稳定值为 4 400 m³/s;下荆江裁弯前、后该值为 4 300 m³/s,葛洲坝截流后该值在 4 500~4 700 m³/s;三峡水库运用后该值降至 4 000 m³/s 左右。图 5(b)为各研究时段内不同螺山站流量级别下,其流量每增加 1 000 m³/s 对应的城陵矶水位抬升值 $\Delta Z_{\text{城陵矶}}$ 变化情况:该值随螺山流量增加而逐渐减少,其中调弦口建闸前与之后几个时段差别较大;在螺山流量小于 20 000 m³/s 时,建闸前对应的 $\Delta Z_{\text{城陵矶}}$ 显著大于之后几个时段;当螺山流量大于 20 000 m³/s 时,则较后几个时段要小;建闸后,在螺山流量为平滩流量级别 35 000 m³/s 时,每增加 1 000 m³/s 城陵矶水位抬升 0.22 m。图 5(c)为不同城陵矶水位级别下,其水位每抬升 1 m 对应的南咀水位抬升值 $\Delta Z_{\text{南咀}}$ 变化情况:在调弦口堵口前后总体上 $\Delta Z_{\text{南咀}}$ 随城陵矶水位上升的变化相对较小;自下荆江系统裁弯完成后至三峡水库运用后 $\Delta Z_{\text{南咀}}$ 逐渐较建闸前后增加,其中裁弯后 $\Delta Z_{\text{南咀}}$ 在城陵矶水位级别为 22~30 m 时增幅较大;葛洲坝截流后和三峡水库运用后 $\Delta Z_{\text{南咀}}$ 在城陵矶水位为 25~32 m 增幅最大;平滩河槽城陵矶水位由 29 m 升至 30 m 时, $\Delta Z_{\text{南咀}}$ 在建闸前后为 0.43 m、裁弯后为 0.50 m、葛洲坝截流后和三峡水库运用后为 0.63 m,较建闸前后增加 0.20 m。从 $\Delta Z_{\text{汉口}} \rightarrow \Delta Q_{\text{螺山}} \rightarrow \Delta Z_{\text{城陵矶}} \rightarrow \Delta Z_{\text{南咀}}$ 的变化来看,城汉河段与洞庭湖的响应关系发生显著变化是在 19 世纪 80 年代初,主要是

因干流和湖区的淤积量同时减少(前 3 个时段中皆未出现此变化),至三峡水库运用后甚至出现同时发生冲刷。若仅考虑江湖泥沙冲淤变化及分配格局,上述变化在近期内是有利于加大洞庭湖调蓄能力、减轻城汉河段洪水压力的,但三峡工程的运行增加了影响因素的复杂性与多样性,如近几年汉口超警戒水位的频繁出现,除了对江湖内在联动机制的分析外,还需在日后的研究中进一步考虑三峡水库的调蓄作用及支流影响。

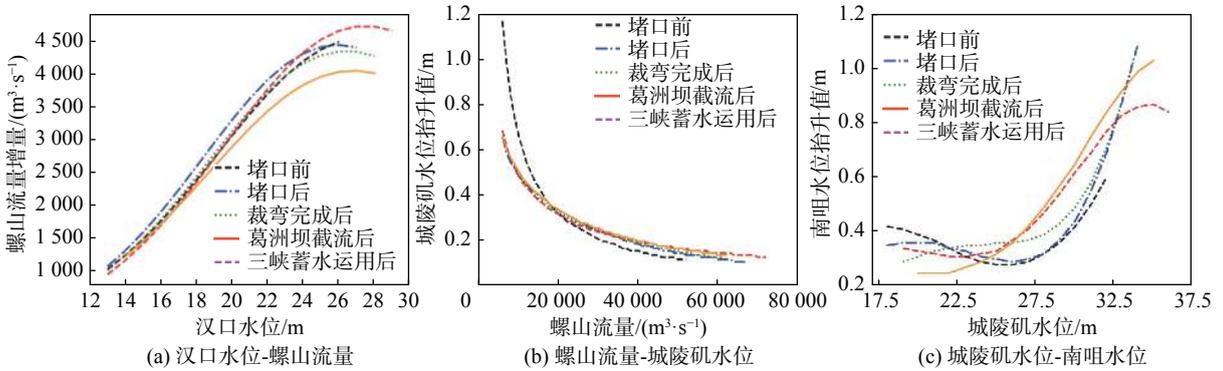


图 5 各研究时段江湖水沙交换各关键节点处响应关系变化

Fig. 5 Response relationships at key nodes of water and sediment exchange in Yangtze River and Dongting Lake

图 6 为荆江三口、监利及沙市输沙率对宜昌流量每增加 1 000 m³/s 的响应关系。增量基本是随宜昌流量增加而增加,其中在三峡水库蓄水运用后,ΔQ_{宜昌}=1 000 m³/s 对应的监利、沙市输沙率增量 ΔS_{监利}、ΔS_{沙市}较之前几个研究时段减少得最为显著,如前述分析该变化主要是因上游来沙量的锐减;三口输沙率 ΔS_{三口}却自裁弯完成后逐时段皆有较大幅度的减小。本文采用各研究时段中、各宜昌流量级别下 ΔS_{沙市}与 ΔS_{三口}的比值变化(见表 3)来分析荆江干流与三口输沙率对汉口水位的响应程度,比值越大,说明三口分泄水沙量对上游来水增加的响应程度越弱。整体上看,ΔS_{沙市}与 ΔS_{三口}的比值逐时段增大,除在调弦口建闸前,其余时段的值随宜昌流量皆呈“V”型先减后增的变化趋势,且在三峡水库蓄水运用前,由增变减的转折点都在宜昌流量为 35 000 m³/s,建库后前移至 25 000 m³/s,建闸后、裁弯后、葛洲坝截流后该转折点值(即最小值)分别为 1.75、2.66、3.40 和 4.30。上述变化反映出三峡水库运用后荆江干流与三口对上游宜昌来水响应关系的两方面问题:①三口的输沙率对宜昌来水响应程度在汛前及汛后(宜昌流量在 25 000 m³/s)较强;②总体上三口对干流来水变化的响应能力随时间逐渐下降,即三口分流分沙比的大小对干流水文情势影响或将再度减小,特别地,枯水期在宜昌流量小于 10 000 m³/s 时,较葛洲坝截流后小,三口输沙率相对增强,主要是清水下泄引起三口口门和河道皆有冲刷,利于枯水期三口的分流分沙。

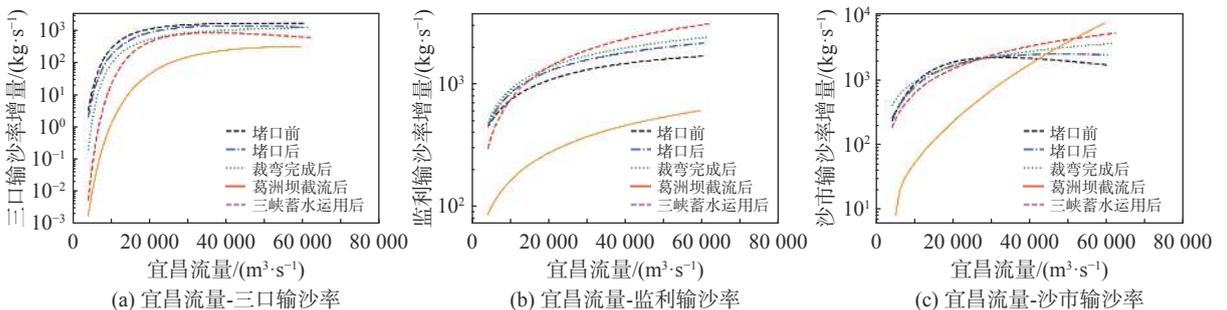


图 6 荆江三口、监利及沙市输沙率对宜昌流量变化的响应

Fig. 6 Response of sediment transport rates of the three outlets of Jingjiang, Jianli and Shashi stations to discharge variation in Yichang

表 3 各研究时段 $\Delta S_{\text{沙市}}/\Delta S_{\text{三口}}$ 变化 ($\Delta Q_{\text{宜昌}}=1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$)
 Tab. 3 Ratio of the sediment flux increase of Shashi to the three outlets

宜昌站流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	$\Delta S_{\text{沙市}}/\Delta S_{\text{三口}}$			
	调弦口建闸前/后	下荆江裁弯后	葛洲坝截流后	三峡水库蓄水运用后
5 000	24.2/41.6	321.3	4 219.2	836.0
6 000	11.7/19.8	95.7	924.5	514.3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10 000	3.1/4.5	10.0	29.2	41.4
11 000	2.7/3.8	7.7	18.2	27.1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
15 000	2.0/2.4	4.2	5.8	9.0
16 000	1.9/2.3	3.8	4.9	7.6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20 000	1.7/2.0	3.1	3.4	5.0
21 000	1.7/1.9	3.0	3.2	4.7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25 000	1.6/1.8	2.8	2.9	4.3
26 000	1.5/1.8	2.7	2.9	4.3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30 000	1.5/1.7	2.7	3.0	4.6
31 000	1.5/1.7	2.7	3.1	4.8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
35 000	1.4/1.7	2.7	3.4	5.6
36 000	1.4/1.8	2.7	3.5	5.8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
40 000	1.3/1.8	2.7	4.0	7.2
41 000	1.3/1.8	2.7	4.1	7.6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
45 000	1.2/1.8	2.8	4.7	9.5
46 000	1.2/1.8	2.8	4.9	10.1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
50 000	1.2/1.8	2.8	5.7	12.9
51 000	1.1/1.9	2.9	5.9	13.7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
55 000	1.1/1.9	2.9	6.8	17.6
56 000	1.1/1.9	2.9	7.1	18.8
57 000	1.1/1.9	2.9	7.4	20.0
58 000	1.0/1.9	3.0	7.6	21.3
59 000	1.0/1.9	3.0	7.9	22.7
60 000	1.0/1.9	3.0	8.2	

4 结 语

本文综合分析了近 60 年来各时段长江-洞庭湖江湖水沙交换关键节点处的相关关系及互动响应关系, 得到如下几点江湖水沙交换的演变规律:

(1) 城汉河段的冲淤及水情变化是江湖水沙交换的重要环节。下荆江裁弯工程加速减少了荆江三口的水沙通量, 但三口输沙率的大幅减少未使荆江干流水沙下泄量增加, 沙市和监利输沙率较裁弯前变化不大, 主要是因城汉河段大幅淤积致使荆江段水沙下泄受阻。

(2) 三峡水库运用后, 荆江三口与监利站、监利站与沙市站输沙率的相关性皆较建库前显著降低, 荆江

河段上下游间、主支汊间的水沙联系相对减弱。

(3)汉口水位高于26 m时,汉口站水位每抬升1 m,对应的螺山站流量增量 $\Delta Q_{螺山}$ 基本达到一稳定值,调弦口堵口前后该稳定值为4 400 m³/s,下荆江裁弯前后该值为4 300 m³/s,葛洲坝截流后该值在4 500~4 700 m³/s,三峡水库运用后该值降至4 000 m³/s左右。

(4)三峡水库蓄水运用后,在各宜昌流量级别下 $\Delta Q_{宜昌}=1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 对应的沙市和三口输沙率增量比值 $\Delta S_{沙市}/\Delta S_{三口}$ 基本大于前几个研究时段,三口水沙分泄能力对宜昌来水量的响应程度相对减弱,且在汛前和汛后,宜昌来水量增加最有利于三口水沙的分泄,其水沙分泄能力对来水量的响应程度比汛期时要强。

参 考 文 献:

- [1] 许全喜,胡功宇,袁晶.近50年来荆江三口分流分沙变化研究[J].泥沙研究,2009(5):1-8.(XU Quanxi, HU Gongyu, YUAN Jing. Research on the flow and sediment diversion in the three outlets along Jingjiang River in recent 50 years[J]. Journal of Sediment Research, 2009(5): 1-8. (in Chinese))
- [2] 卢金友.荆江三口分流分沙变化规律研究[J].泥沙研究,1996(4):55-62.(LU Jinyou. Study on laws of runoff and sediment diverted from three outfalls on the Jingjiang reach of the Yangtze River[J]. Journal of Sediment Research, 1996(4): 55-62. (in Chinese))
- [3] 刘卡波,丛振涛,栾震宇.长江向洞庭湖分水演变规律研究[J].水力发电学报,2011,30(5):16-19.(LIU Kabo, CONG Zhentao, LUAN Zhenyu. Runoff from Yangtze River into Dongting Lake through four inlets[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(5): 16-19. (in Chinese))
- [4] OU C M, LI J B, ZHOU Y Q, et al. Evolution characters of water exchange abilities between Dongting Lake and Yangtze River[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(4): 731-745.
- [5] HU C H, FANG C M, CAO W H. Shrinking of Dongting Lake and its weakening connection with the Yangtze River: Analysis of the impact on flooding[J]. International Journal of Sediment Research, 2015, 30(3): 256-262.
- [6] 方春明,毛继新,陈绪坚.三峡工程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.(FANG Chunming, MAO Jixin, CHEN Xujian. Simulation of erosion and sedimentation at triple-branches of the Jingjiang River after operation of the Three Georges Project[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2007, 5(3): 181-185. (in Chinese))
- [7] 宫平,杨文俊.三峡水库建成后对长江中下游江湖水沙关系变化趋势初探Ⅱ.江湖关系及槽蓄影响初步研究[J].水力发电学报,2009,28(6):120-125.(GONG Ping, YANG Wenjun. Preliminary study of river-lake evolution effect due to Three Gorges project. Part 2. The effect on riverlake relation and channel storage capacity[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(6): 120-125. (in Chinese))
- [8] 朱玲玲,许全喜,戴明龙.荆江三口分流变化及三峡水库蓄水影响[J].水科学进展,2016,27(6):822-831.(ZHU Lingling, XU Quanxi, DAI Minglong. Runoff diverted from the Jingjiang reach to the Dongting Lake and the effect of Three Gorges Reservoir[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(6): 822-831. (in Chinese))
- [9] 李义天,郭小虎,唐金武,等.三峡建库后荆江三口分流的变化[J].应用基础与工程科学学报,2009,17(1):21-31.(LI Yitian, GUO Xiaohu, TANG Jinwu, et al. Changes on runoff diversion from jingjiang reach of the Yangtze River to Dongting Lake after the operation of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(1): 21-31. (in Chinese))
- [10] 渠庚,郭小虎,朱勇辉,等.三峡工程运用后荆江与洞庭湖关系变化分析[J].水力发电学报,2012,31(5):163-172.(QU Geng, GUO Xiaohu, ZHU Yonghui, et al. Change in relationship of Jingjiang River and Dongting Lake after operation of Three Gorges Project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 163-172. (in Chinese))
- [11] 张欧阳,熊明.洞庭湖排沙比变化及影响因素分析[J].人民长江,2006,37(12):117-119.(ZHANG Ouyang, XIONG Ming. The change of sediment discharge ratio in Dongting lake and its influencing factors[J]. Yangtze River, 2006, 37(12): 117-119. (in Chinese))
- [12] 丛振涛,肖鹏,章诞武,等.三峡工程运行前后城陵矶水位变化及其原因分析[J].水力发电学报,2014,33(3):23-28.

- (CONG Zhentao, XIAO Peng, ZHANG Danwu, et al. Water stage at Chenglingji before and after the Three Gorges project[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(3): 23-28. (in Chinese))
- [13] 郑颖. 洞庭湖出口中枯水位特征及变化趋势[J]. *湖南水利水电*, 2017(2): 50-52. (ZHENG Ying. Characteristics and variation trend of dry water level in Dongting lake outlet[J]. *Hunan Hydro & Power*, 2017(2): 50-52. (in Chinese))
- [14] 李振林, 唐从胜. 洞庭湖顶托对下荆江泄洪量的影响[J]. *水文*, 2000, 20(6): 27-28, 31. (LI Zhenlin, TANG Congsheng. Impact of withstanding flow by the Dongting Lake to flood discharge in the lower Jingjiang River section[J]. *Hydrology*, 2000, 20(6): 27-28, 31. (in Chinese))
- [15] 王冬, 李义天, 邓金运, 等. 三峡水库蓄水期洞庭湖水力要素变化初步分析[J]. *水力发电学报*, 2014, 33(2): 26-32. (WANG Dong, LI Yitian, DENG Jinyun, et al. Preliminary analysis of changes in hydraulic elements of Dongting lake in storage period of Three Gorges reservoir[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(2): 26-32. (in Chinese))
- [16] 王冬. 水库运行后长江与通江湖泊关系演变及水沙输移规律研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014. (WANG Dong. Research on change of Yangtze River-Dongting Lake relations and flow & sediment transport after operation of reservoir[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese))
- [17] 李义天, 李荣, 邓金运. 长江中游泥沙输移规律及对防洪影响研究[J]. *泥沙研究*, 2000(3): 12-20. (LI Yitian, LI Rong, DENG Jinyun. A study on sediment transport and flood control in the middle reach of Yangtze River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2000(3): 12-20. (in Chinese))

Preliminary study on evolutions of Yangtze River and Dongting Lake water and sediment fluxes exchanges based on MLP method

JIA Yalan, SHI Yong

(*Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: This study establishes the regression relationship among key nodes of water and sediment exchange in the Yangtze River and Dongting Lake on the basis of MLP (Multi-layers Perceptrons) method and calculates and analyzes the linkage changes of nodes between the Yangtze River and Dongting Lake. This study draws the following conclusions: (1) Analysis of changes of water and sediment flux in the three outlets and the main stream after Jingjiang artificial cut off shows that the riverbed erosion and water regime change in the Chenghan River section is one of the most important links in the water and sediment flux evolution of the Yangtze River and Dongting Lake. The serious sedimentation of the Chenghan River section leads to the discharge of water and sediment in Jingjiang blocked. (2) After the application of the TGP (Three Gorges Project), the flow and sediment relations between the upper and lower reaches, the mainstream and tributaries of the Jingjiang are weakened in a relatively prominent degree. (3) When the water level of Hankou is higher than 26 m, the flow increase of Luoshan is basically stable when the water level of Hankou has a rise of 1 m. The stable value is 4,400 m³/s, 4,300 m³/s, 4,500~4,700 m³/s and 4,000 m³/s respectively before and after the sluice construction of Tiaoxian outlet, after the Jingjiang cut off, after the interception of Gezhouba and the operation of the TGP. (4) The response of water and sediment discharge capacities of the three outlets of Jingjiang to Yichang's inflow is weakened gradually. During time intervals before the application of TGP, the response of water and sediment discharge capacities of the three outlets to Yichang's inflow is the strongest when the water discharge of Yichang is 35,000 m³/s in the flood season. After TGP is applied, the response is the strongest when the water discharge of Yichang is 25,000 m³/s before and after the flood season.

Key words: water-sediment fluxes between river and lake; water and sediment exchange; Jingjiang outlet; diversion of water and sediment; the Three Gorges Project