

洞庭湖和鄱阳湖入汇对长江中下游河道冲刷量影响的定量分析

夏军强¹, 尚海鑫¹, 周美蓉¹, 邓珊珊¹, 假冬冬², 胡春宏³

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室; 2. 南京水利科学研究院港口航道泥沙工程交通行业重点实验室;
3. 中国水利水电科学研究院流域水循环与水安全全国重点实验室)

摘要:为定量研究洞庭湖和鄱阳湖入汇对长江中下游河道冲刷量的影响,基于上游干流与两湖入汇的水沙资料,以前 5 年平均水流冲刷强度表征水沙条件,建立了考虑湖泊入汇的河段累计冲刷量计算公式,并计算了两湖入汇对研究河段累计冲刷量的贡献率。结果表明:三峡工程运用后,2002—2023 年洞庭湖和鄱阳湖入汇水量占下游大通站径流量的 45%,沙量占 22%,城陵矶—汉口河段和湖口—大通河段的累计冲刷量分别为 5.1 亿、6.6 亿 m³;研究河段累计冲刷量计算结果与实测值拟合较好,决定系数均大于 0.92;洞庭湖入汇对城陵矶—汉口河段累计冲刷量的贡献率为 3.3%~87.4%,鄱阳湖入汇对湖口—大通河段累计冲刷量的贡献率为 6.6%~19.7%。

关键词:湖泊入汇;冲刷量;水流冲刷强度;洞庭湖;鄱阳湖;长江中下游

Quantitative analysis of confluence impact of Dongting Lake and Poyang Lake on erosion of middle and lower reaches of the Yangtze River//Xia Junqiang¹, Shang Haixin¹, Zhou Meirong¹, Deng Shanshan¹, Jia Dongdong², Hu Chunhong³ (1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University; 2. Key Laboratory of Port, Waterway and Sedimentation Engineering of Ministry of Transport, Nanjing Hydraulic Research Institute; 3. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research)

Abstract: To quantitatively study the impact of the inflow of Dongting Lake and Poyang Lake on the erosion of the middle and lower reaches of the Yangtze River, based on the water and sediment data of the upstream main stream and the inflow of the two lakes, the average water flow erosion intensity over the past five years was used to characterize the water and sediment conditions. A formula for calculating the cumulative erosion of the reaches considering the inflow of lakes was established, and the contribution rate of the inflow of the two lakes to the cumulative erosion of the study reaches was calculated. The results show that after the application of the Three Gorges Project, the inflow of Dongting Lake and Poyang Lake accounts for 45% of the downstream runoff at Datong Station from 2002 to 2023, and the sediment content accounts for 22%. The cumulative erosion amounts of the Chenglingji-Hankou and Hukou-Datong reaches are 510 million m³ and 660 million m³, respectively. The calculated cumulative erosion amount of the research reaches fits well with the measured values, and the determination coefficients are both greater than 0.92. The contribution rate of Dongting Lake's inflow to the cumulative erosion of the Chenglingji-Hankou Reach is 3.3% to 87.4%, while the contribution rate of Poyang Lake's inflow to the cumulative erosion of the Hukou-Datong Reach is 6.6% to 19.7%.

Key words: lake confluence; erosion amount; flow erosion intensity; Dongting Lake; Poyang Lake; middle and lower reaches of the Yangtze River

三峡及上游水库群运行后,长江中下游河段发生了长时间、长距离的河床冲刷^[1-3],2002—2023 年宜昌—大通河段平滩河槽累计冲刷量达 32 亿 m³。除了三峡水库清水下泄的影响以外,洞庭湖和鄱阳湖汇入的水沙也是影响坝下游河段冲刷的重要因素^[4-6],两湖入汇的水量和沙量分别占下游大通站的

1/2 和 1/5。两湖入汇导致长江中下游干流水沙过程变化显著,进而影响坝下游河道冲淤过程^[7-8],但目前关于两湖入汇的具体贡献仍不明确。因此,定量分析两湖入汇对长江干流冲刷量影响的贡献率,不仅有利于加深对坝下游河床演变规律的认识,而且对分析长江中下游持续冲刷的确切原因具有重要

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3209501);国家自然科学基金项目(52479075)
作者简介:夏军强(1974—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: xiajq@whu.edu.cn
通信作者:周美蓉(1992—),女,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: zmr@whu.edu.cn

意义。

有研究表明,三峡工程运用后,城陵矶下游河段含沙量显著减小,流量由于洞庭湖入汇而显著增加^[9-11],城陵矶—汉口河段(以下简称“城汉河段”)水流挟沙力显著改变^[12]。而由鄱阳湖湖口站进入长江干流的年均沙量明显增加^[13-14],干流在汛期倒灌鄱阳湖的时间减少,汛末三峡蓄水期鄱阳湖湖水流出加快^[15]。这些入汇水沙条件的变化均会对湖口以下河段的水沙过程产生影响,已有研究表明湖泊入汇会导致汇流口下游的河床出现剧烈冲刷^[16-17]。Zhou 等^[18]研究发现洞庭湖入汇导致干流水沙过程的不连续性是引起汇流河段冲淤变化的关键驱动因素。王淑平等^[19]研究了鄱阳湖与长江汇流河段的冲淤变化特征,认为汇流河段的水流流速增大有利于床面泥沙起动,并引起河床冲刷。还有研究认为入汇流量与干流流量的比值、干支流水流密度差异等因素也影响汇流河段的河床冲淤^[20-22]。虽然这些研究成果揭示了两湖入汇对干流水沙输移特性的影响,表明汇流口下游河段的冲淤变化与入汇后水沙条件密切相关,但不能定量剥离两湖入汇对长江干流中下游河段冲刷量的影响。此外,现有研究更多关注汇流口附近局部河段的冲淤变化,缺少湖泊入汇对汇流口以下河段累计冲刷量影响的定量研究。

鉴于此,本文结合三峡工程运用后城汉河段与湖口—大通河段的水文泥沙及河段冲淤量实测资料,分析湖泊水沙入汇对长江中下游干流河段冲淤变化的影响机制,建立考虑湖泊入汇影响的下游河段累计冲刷量计算公式,从而定量识别两湖入汇对汇流口下游河段冲刷量的贡献率。

1 研究河段概况

洞庭湖和鄱阳湖为长江中下游两大通江湖泊,分别于城陵矶和湖口处汇入长江干流。三峡水库坝

下游河段中,城汉河段和湖口—大通河段分别位于两湖汇流口的下游(图 1),其水沙条件明显受两湖入汇的影响,故本文以这两个河段作为研究河段。城汉河段全长约 254 km,其水沙过程主要受荆江和洞庭湖入汇的影响;湖口—大通河段全长约 228 km,其水沙过程主要受上游干流和鄱阳湖入汇的影响。本文主要收集了长江干流及两湖汇流口河段 6 个水文站的水沙资料以及研究河段的冲淤量数据,研究时段为 2002—2023 年。监利站位于洞庭湖汇流口上游,近似代表上游干流来水来沙情况;螺山站近似代表洞庭湖入汇后进入城汉河段的水沙情况;九江站位于鄱阳湖汇流口上游,近似代表上游干流的水沙情况;大通站代表湖口—大通河段出口处水沙情况;七里山站与湖口站分别代表洞庭湖与鄱阳湖汇入长江干流的水沙情况。

受三峡工程及上游水库群的影响,进入三峡水库坝下游河段的水量与沙量发生改变,主要表现为径流量变化不大、输沙量显著减小。与三峡工程运用前(1990—2002 年)相比,三峡工程运用后(2002—2023 年)宜昌站多年平均径流量由 4300 亿 m^3 调整到 4154 亿 m^3 ,减少约 3.4%;多年平均输沙量由 3.97 亿 t 减少至 0.31 亿 t,减少约 92.3%。洞庭湖汇流口上游的监利站多年平均径流量由 3968 亿 m^3 调整到 3759 亿 m^3 ,减少约 5.0%;多年平均输沙量由 3.14 亿 t 减少至 0.63 亿 t,减少约 79.9%。鄱阳湖汇流口上游的九江站多年平均径流量由约 7572 亿 m^3 调整到 7044 亿 m^3 ,减少约 7.0%;多年平均输沙量由 2.77 亿 t 减少至 0.84 亿 t,减小约 69.7%。两湖入汇是长江中下游干流径流、泥沙的重要来源,三峡工程运用明显改变了其水沙条件,相比三峡工程运用前,两湖入汇径流量减小,洞庭湖入汇沙量减少,鄱阳湖入汇沙量增加。图 2 为 2002—2023 年各水文站多年平均径流量和输沙量,可见各水文站的径流量和输沙量均呈波动上升

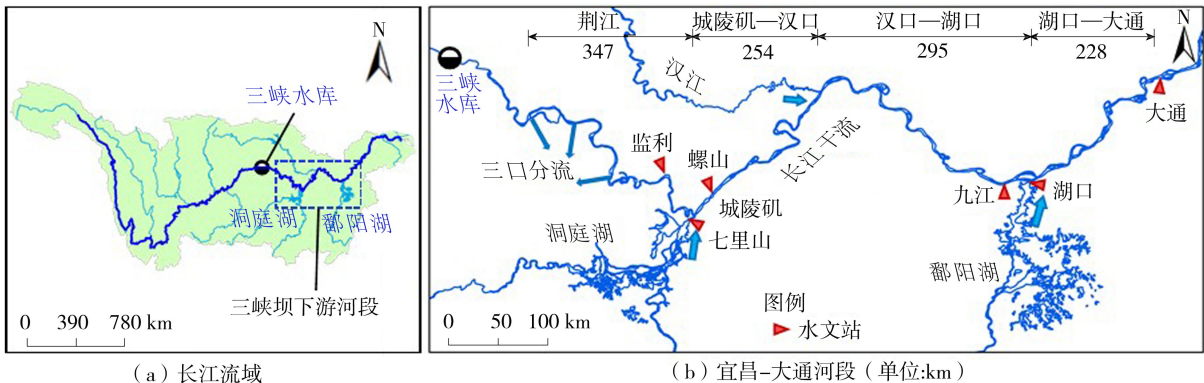


图 1 研究河段位置及主要水文站分布

Fig. 1 Location of study reaches and distribution of major hydrological stations

的趋势。三峡工程运用后,两湖入汇水量在下游大通站径流量中占比约 45%,沙量占比约 22%。洞庭湖出口控制站(七里山)的多年平均径流量为 2430 亿 m³,比工程运用前减小约 14.2%,与汇流口上游监利站年均径流量的比值约为 0.65;多年平均输沙量为 0.17 亿 t,比工程运用前减小约 32.4%,与监利站年均输沙量的比值约 0.26。鄱阳湖出口控制站(湖口)多年平均径流量为 1485 亿 m³,比工程运用前减少约 13.6%,与汇流口上游九江站年均径流量的比值为 0.21;多年平均输沙量为 0.10 亿 t,比工程运用前增加约 35.7%,与九江站年均输沙量的比值为 0.12。

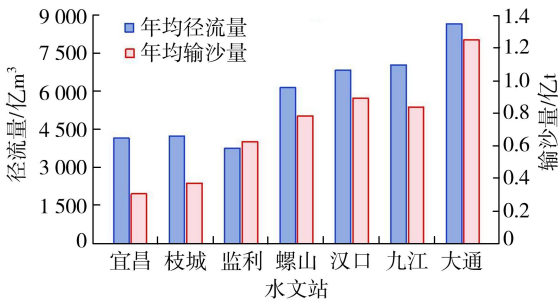


图 2 2002—2023 年各水文站多年平均径流量与输沙量
Fig. 2 Average annual runoff and sediment transport at hydrological stations from 2002 to 2023

2002 年 9 月至 2023 年 10 月,三峡坝下游宜昌—大通河段的平滩河槽总冲刷量约 32 亿 m³,其中,城汉河段和湖口—大通河段平滩河槽在研究时段内的连续累计冲刷量分别为 5.1 亿 m³ 和 6.6 亿 m³ (图 3),分别占宜昌—大通河段总冲刷量的 16% 和 21%。城汉河段基本处于持续冲刷状态,但冲刷程度有所变化。城汉河段在三峡水库蓄水后的前 3 年(2002—2005 年)冲刷量较小,累计冲刷量仅为 0.7 亿 m³,占蓄水以来总冲刷量的 14%;2005—2012 年冲刷量最小,累计冲刷量为 0.5 亿 m³,占蓄水以来总冲刷量的 10%;2012 年之后冲刷显著增强,累计冲刷量达 3.9 亿 m³,多年平均冲刷量 0.3 亿 m³,占蓄水以来总冲刷量的 76%。湖口—大通河段整体呈冲刷持续增强的趋势,三峡水库蓄水后的前 10 年

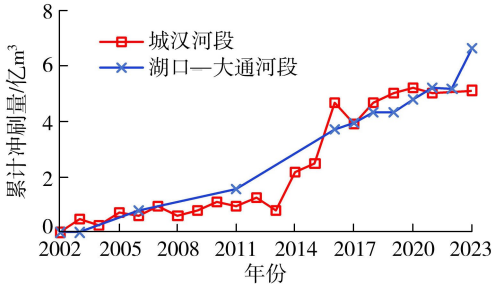


图 3 2002—2023 年研究河段平滩河槽累计冲刷量
Fig. 3 Cumulative scour volume of flat riverbed in study reaches from 2002 to 2023

(2002—2012 年)冲刷强度较弱,累计冲刷量为 1.5 亿 m³,多年平均冲刷量 0.15 亿 m³,占蓄水以来总冲刷量的 23%;2012 年后冲刷显著增强,2013—2023 年累计冲刷量达 5.1 亿 m³,多年平均冲刷量 0.57 亿 m³,占蓄水以来总冲刷量的 77%。

2 研究方法

2.1 考虑湖泊入汇的河段冲刷量计算公式

为量化洞庭湖和鄱阳湖入汇对长江干流冲刷量的影响,从湖泊入汇改变汇流口下游水沙过程的角度,基于长江中下游干流与两湖汇流口水文站的日均流量、含沙量实测资料,建立汇流口以下河段累计冲刷量与干流来流、湖泊入汇的水流冲刷强度之间的函数关系,进而通过因素分解计算湖泊入汇对汇流口下游河段冲刷量影响的贡献率。

2.1.1 确定水沙条件

水沙条件是影响河床冲淤过程的主要因素,考虑流量、含沙量及历时的影响,采用水流冲刷强度表征河段水沙条件^[23-26],反映不同水沙条件对河段冲淤调整的影响,计算公式为:

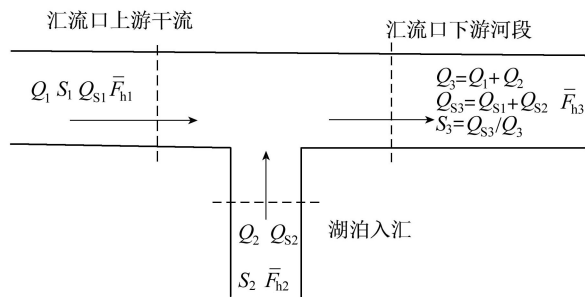
$$\bar{F}_h = \bar{Q}_h^2 / (\bar{S}_h \times 10^8) \quad (1)$$

式中: $\bar{F}_h$ 为水文年平均水流冲刷强度,是反映来水来沙条件对河段冲淤调整影响的综合指标; $\bar{Q}_h$ 为水文年平均流量; $\bar{S}_h$ 为水文年平均含沙量。由实测资料分析可知,三峡工程运用前长江中游典型断面输沙率与流量成正比关系, $\bar{Q}_h^2$ 可近似代表河段进口的水流挟沙能力, $\bar{F}_h$ 则代表某一特定流量下挟沙力与含沙量的比值, $\bar{F}_h$ 越大表示水流冲刷越强。水流冲刷强度这一指标考虑了流量、含沙量及历时,能够有效反映水沙条件改变对河道冲刷量的影响,可作为表征研究河段冲刷演变的关键指标。

河床冲淤变形不仅与当前水沙条件相关,还受到前期水沙条件的滞后影响^[27-29],采用前 n 年平均水流冲刷强度 $\bar{F}_{nh}$ 进行表征。图 4 为汇流口水沙过程示意图,可见汇流后的水沙量由上游河段来流和湖泊入汇构成,图中 $\bar{F}_{h3}$ 基于上游干流流量与湖泊入汇的流量、输沙率计算得到。计算研究河段 2002—2023 年累计冲刷量 V 与 $\bar{F}_{h3}$ 的 Pearson 相关系数,结果表明:研究河段累计冲刷量与前期水流冲刷强度之间的相关程度随平均年数的不同而改变,二者相关系数在 $n=5$ 时达到最大,城汉河段和湖口—大通河段的相关系数分别达到 0.85 (显著性水平 $p<0.01$)、0.84 ($p<0.01$),故采用前 5 年平均水流冲刷强度 $\bar{F}_{5h3}$ 表征研究河段的水沙条件。

2.1.2 河段累计冲刷量与水沙条件的关系

建立 $\bar{F}_{5h3}$ 与汇流口下游河段累计冲刷量 V 的



注: Q_1 、 Q_2 、 Q_3 分别为上游干流、湖泊入汇、汇流口下游的流量; Q_{S1} 、 Q_{S2} 、 Q_{S3} 分别为上游干流、湖泊入汇、汇流口下游的输沙率; S_1 、 S_2 、 S_3 分别为上游干流、湖泊入汇、汇流口下游的含沙量; $\bar{F}_{h1}$ 、 $\bar{F}_{h2}$ 、 $\bar{F}_{h3}$ 分别为上游干流、湖泊入汇、汇流口下游的水流冲刷强度。

图4 汇流口水沙过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of water and sediment transport process at confluence

函数关系式,反映河段累计冲刷过程对汇流口下游河段水沙条件的滞后响应,表达式为:

$$V = \alpha \bar{F}_{sh3}^{\beta} \quad (2)$$

式中: α 为系数; β 为指数。 α 、 β 基于非线性最小二乘法原理,以三峡工程运用后研究河段累计冲刷量计算值与实测值的残差平方最小与决定系数 (R^2) 最大为优化目标,通过非线性回归方法确定。

为了能区分干流水沙与湖泊入汇水沙对汇流口下游河段冲刷过程的影响,建立考虑上游干流和湖泊入汇水流冲刷强度的汇流口下游河段累计冲刷量的计算公式:

$$V = \alpha_1 \bar{F}_{sh1}^{\beta_1} + \alpha_2 \bar{F}_{sh2}^{\beta_2} \quad (3)$$

式中: $\bar{F}_{sh1}$ 、 $\bar{F}_{sh2}$ 分别为汇流口上游干流、湖泊入汇的前5年平均水流冲刷强度; α_1 、 α_2 为系数; β_1 、 β_2 为指数。为使式(3)反映的水流冲刷强度与河段冲刷量的关系与式(2)一致,在确定 β_1 、 β_2 时限制其与 β 值相近,在 $\beta \pm 0.25$ 范围内变化。

2.2 贡献率计算方法

因素分解法可以通过数学运算将综合性指标的变化量分解为多个相互关联因素的独立贡献,从而量化各因素对结果的影响程度^[30]。其原理为:在假定其他因素不变的前提下,通过依次改变每个因素的数值,计算其对结果变动的单独影响;通过对比各因素引起的变动量占结果总变动量的比例,得到各因素的贡献率^[31-32]。本文采用因素分解法定量识别两湖入汇对城汉河段与湖口—大通河段累计冲刷量的贡献率,式(3)中第一项 $\alpha_1 \bar{F}_{sh1}^{\beta_1}$ 和第二项 $\alpha_2 \bar{F}_{sh2}^{\beta_2}$ 分别表示上游干流来水来沙导致的冲刷量 (V_M) 和湖泊水沙入汇导致的冲刷量 (V_T),进而计算 V_M 、 V_T 与 V 的比值,即分别为汇流口上游干流和湖泊入汇对汇流口下游河段冲刷量的贡献率。

3 结果与分析

3.1 洞庭湖入汇对城汉河段冲刷量的贡献率

洞庭湖入汇后,城汉河段的流量与含沙量通过监利站和七里山站的实测资料换算。需要说明的是:监利站与城陵矶之间的河段长约 80 km,这一河段的河床冲刷也会影响进入城汉河段的含沙量;但考虑到该河段冲刷强度较小,2002—2023 年的平均冲刷强度约 0.13 亿 m^3/a ,即使将这部分冲刷量折算到输沙量,其对荆江出口日均含沙量的影响也很小,为简化计算,在后续分析中暂不折算这部分河床冲刷对荆江段出口含沙量的影响。

螺山水文站位于洞庭湖入汇口下游约 30 km,可用于监测荆江与洞庭湖出流汇合后的水文情况。为验证式(2)在洞庭湖入汇城汉河段研究中的适用性,基于 2002—2023 年的实测资料,将计算得到的城汉河段日均流量、日均含沙量、水流冲刷强度与螺山站实测值进行对比,结果如图 5 所示。结果表明,

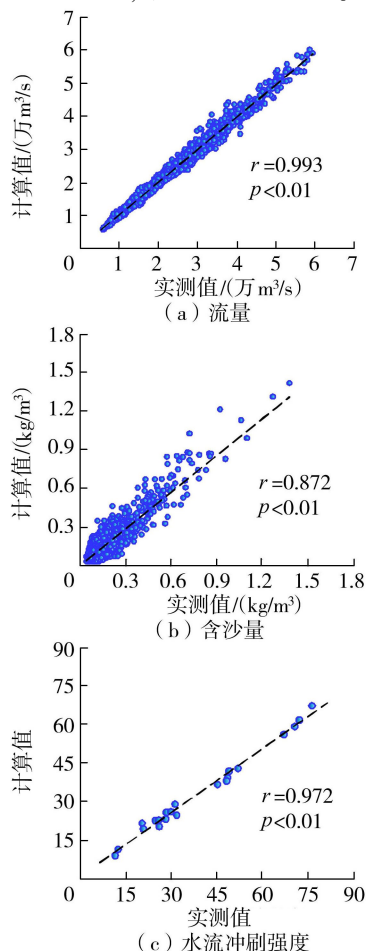


图5 城汉河段计算流量、含沙量、水流冲刷强度与螺山站实测值对比

Fig. 5 Comparison of calculated discharge, sediment concentration, and flow erosion intensity of Chenghan Reach with measured values at Luoshan Station

流量、含沙量、水流冲刷强度的相关系数分别为 0.993($p<0.01$)、0.872($p<0.01$)、0.972($p<0.01$)。采用配对样本 t 检验分析计算得到的含沙量和水流冲刷强度与螺山站实测值的差异,结果显示二者无显著差异($p>0.1$),故计算得到的含沙量能反映城汉河段的输沙过程,基于监利站与七里山站实测资料换算得到的 $\bar{F}_{sh3}$ 能反映城汉河段的水沙条件。

根据三峡工程运用后城汉河段实际冲淤数据,率定得到式(2)中 $\alpha=-24$ 、 $\beta=1.91$,表明河床冲刷量基本与前期水流冲刷强度呈正相关关系,即水流冲刷强度越大,河床冲刷量越大,说明该公式具有明确的物理意义。计算结果与实测值之间的 $R^2=0.90$,表明式(2)的计算结果与实际累计冲刷量符合较好,建立的公式能够反映三峡工程运行后城汉河段的冲刷过程。为考虑干流来流和洞庭湖入汇的影响,进一步率定得到式(3)中 $\alpha_1=-49$ 、 $\beta_1=2.16$ 、 $\alpha_2=-89$ 、 $\beta_2=1.84$,图 6 为式(3)计算的城汉河段累计冲刷量与实测值对比。计算结果与实测值之间的 $R^2=0.92$,可见式(3)计算得到的干流来流与洞庭湖入汇共同影响下的城汉河段累计冲刷量与实际冲刷过程吻合较好。

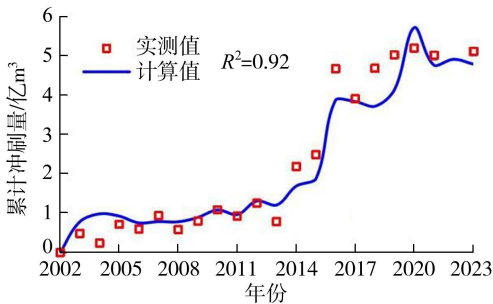


图 6 式(3)计算的城汉河段累计冲刷量与实测值对比
Fig. 6 Comparison of cumulative scour volumes calculated by Eq. (3) with measured values for Chenghan Reach

2002—2023 年城汉河段的实测累计冲刷量约 5.1 亿 m^3 。由式(3)第一项计算得到干流荆江来水来沙引起的城汉河段累计冲刷量约 4.6 亿 m^3 ,第二项计算得到洞庭湖水沙入汇引起的城汉河段累计冲刷量约 0.2 亿 m^3 。图 7 为上游干流和洞庭湖入汇对城汉河段累计冲刷量影响的贡献率,可见洞庭湖入汇对城汉河段累计冲刷量的贡献率为 3.3%~87.4%。

3.2 鄱阳湖入汇对湖口—大通河段冲刷量的贡献率

鄱阳湖入汇后,湖口—大通河段的流量与含沙量通过九江站和湖口站的实测资料换算。九江站与湖口之间的河段长约 30 km,这一河段的河床冲刷也会影响进入湖口—大通河段的含沙量;但考虑到

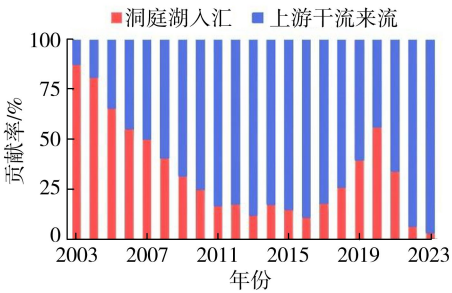


图 7 上游干流和洞庭湖入汇对城汉河段累计冲刷量影响的贡献率
Fig. 7 Contribution rate of impact of upstream main stream and inflow of Dongting Lake on cumulative erosion of Chenghan Reach

该河段冲刷强度较小,2002—2023 年的平均冲刷强度约 0.09 亿 m^3/a ,即使将这部分冲刷量折算到输沙量,其对河段出口含沙量的影响很小,为简化计算,在后续分析中暂不折算这部分河床冲刷对进入湖口—大通河段含沙量的影响。

根据三峡工程运用后湖口—大通河段实际冲淤数据,率定得到式(2)中 $\alpha=-6$ 、 $\beta=1.94$,计算结果与实测值的 $R^2=0.95$,可见式(2)计算得到的累计冲刷量与实际情况符合较好,表明建立的公式能够反映三峡工程运行后湖口—大通河段累计冲刷过程。为考虑干流来流与鄱阳湖入汇对湖口—大通河段累计冲刷量的影响,进一步率定得到式(3)中 $\alpha_1=-9$ 、 $\beta_1=2.03$ 、 $\alpha_2=-88$ 、 $\beta_2=2.18$ 。图 8 为式(3)计算的湖口—大通河段累计冲刷量与实测值对比。计算结果与实测值之间的 $R^2=0.94$,可见考虑干流来流与鄱阳湖入汇共同影响的湖口—大通河段累计冲刷量与实测值吻合较好。

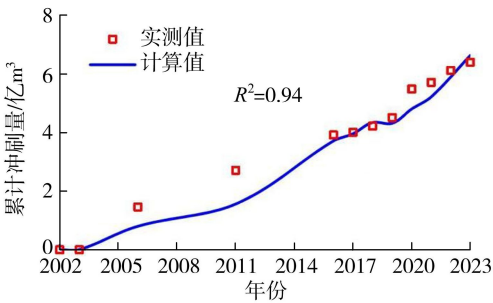


图 8 式(3)计算的湖口—大通河段累计冲刷量与实测值对比
Fig. 8 Comparison of cumulative scour volumes calculated by Eq. (3) with measured values for Hukou-Datong Reach

2002—2023 年湖口—大通河段的实测累计冲刷量约 6.6 亿 m^3 。由式(3)中第一项计算得到上游河段来水来沙引起湖口—大通河段的累计冲刷量约 5.4 亿 m^3 ,由第二项计算得到鄱阳湖水沙入汇引起湖口—大通河段的累计冲刷量约 1.0 亿 m^3 。图 9

上游干流和鄱阳湖入汇对湖口—大通河段累计冲刷量影响的贡献率,由于数据缺测,图中 2003—2006 年、2007—2011 年、2012—2016 年的贡献率以时段初的数值代替,可见鄱阳湖入汇对湖口—大通河段累计冲刷量的贡献率为 6.6%~19.7%。

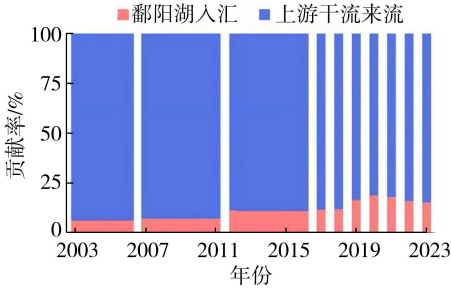


图9 上游干流和鄱阳湖入汇对湖口—大通河段累计冲刷量影响的贡献率

Fig. 9 Contribution rate of impact of upstream main stream and inflow of Poyang Lake on cumulative erosion of Hukou-Datong Reach

需说明的是,式(3)分别应用于城汉河段和湖口—大通河段时,参数率定结果中 α_1 的差异较大,这主要是由干流来流与两湖入汇的水流冲刷强度不同导致。对于城汉河段,上游干流来流和洞庭湖入汇 $\bar{F}_{sh1}$ 和 $\bar{F}_{sh2}$ 的变化范围分别为4.0~23.9和4.6~24.6,数值相近;对于湖口—大通河段,上游干流来流和鄱阳湖入汇 $\bar{F}_{sh1}$ 和 $\bar{F}_{sh2}$ 的变化范围分别为33.5~72.6和1.1~7.6,相差较大。在参数率定过程中,当 $\bar{F}_{sh1}$ 和 $\bar{F}_{sh2}$ 的数量级改变时,公式参数需进行相应的较大调整,才能更好地对计算值和实测值进行拟合,可见建立的公式具有一定的物理意义。

3.3 合理性分析

螺山水文站距离洞庭湖汇流口较近,能近似反映汇流后的水沙条件。为进一步讨论本文构建的公式的合理性,设置两组条件:第一组采用上游干流和洞庭湖入汇的实测水沙资料换算出城汉河段的水沙条件对式(2)进行参数率定;第二组采用螺山水文站的实测水沙资料计算得到城汉河段的水沙条件对式(2)进行参数率定。基于两组水沙条件,计算城汉河段的水流冲刷强度,变化范围分别为8.7~27.9和9.5~32.6,比较接近;城汉河段的水流冲刷强度相比于干流来流均增加了1.8倍左右,反映出两组条件下,洞庭湖入汇的影响也相当。基于两组条件分别率定的参数值,利用式(2)计算得到城汉河段的2002—2023年平均累计冲刷量分别为5.12亿、5.07亿 m^3 。图10为两组条件下式(2)计算的城汉河段累计冲刷量与实测值对比,拟合结果的 R^2 分别为0.92和0.91,拟合精度均较高。可见换算出的水沙条件与计算得到的水沙条件均能较准确地反演

城汉河段的冲刷过程,因此,在剥离湖泊入汇对汇流口下游河段冲刷过程影响的研究中,可以基于换算出的水沙条件开展。

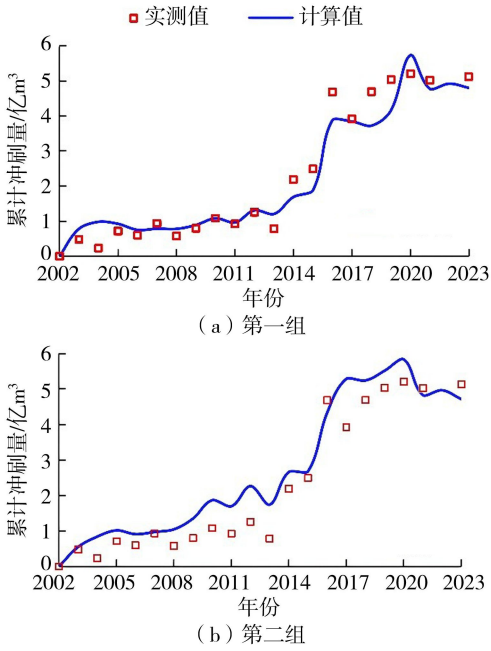


图10 两组条件下式(2)计算的城汉河段累计冲刷量与实测值对比

Fig. 10 Comparison between cumulative erosion amount of Chenghan Reach calculated by Eq. (2) and measured values under two condition sets

4 结 论

- a. 针对长江中下游的城汉河段与湖口—大通河段,建立了考虑洞庭湖和鄱阳湖入汇影响的河段累计冲刷量计算公式,以前5年平均水流冲刷强度表征水沙条件,计算得到的城汉河段与湖口—大通河段累计冲刷量与实测值之间的 R^2 分别为0.92与0.94。
- b. 三峡工程运用后,2002—2023年城汉河段和湖口—大通河段的累计冲刷量分别约5.1亿、6.6亿 m^3 。城汉河段在2002—2005年冲刷量较小,累计冲刷量仅为0.7亿 m^3 ,占蓄水以来总冲刷量的14%;2005—2012年冲刷量最小,累计冲刷量为0.5亿 m^3 ,占蓄水以来总冲刷量的10%;2012年之后冲刷显著增强,累计冲刷量达3.9亿 m^3 ,占蓄水以来总冲刷量的76%。湖口—大通河段整体呈冲刷持续增强的趋势,2002—2012年冲刷强度较弱,累计冲刷量为1.5亿 m^3 ,占蓄水以来总冲刷量的23%;2013—2023年累计冲刷量达5.1亿 m^3 ,占蓄水以来总冲刷量的77%。
- c. 两湖入汇对汇流口下游河段水沙条件有显著影响,2002—2023年洞庭湖水沙入汇引起的城汉

河段累计冲刷量为 0.2 亿 m³,鄱阳湖水沙入汇引起湖口—大通河段的累计冲刷量约 1.0 亿 m³。洞庭湖入汇对城汉河段冲刷量的贡献率为 3.3%~87.4%,鄱阳湖入汇对湖口—大通河段冲刷量贡献率为 6.6%~19.7%。

参考文献:

[1] Xia Junqiang, Zhou Meirong, Lin Fenfen, et al. Variation in reach-scale bankfull discharge of the Jingjiang Reach undergoing upstream and downstream boundary controls [J]. Journal of Hydrology, 2017, 547: 534-543.

[2] 李义天, 薛居理, 孙昭华, 等. 三峡水库下游河床冲刷与水位变化[J]. 水力发电学报, 2021, 40(4): 1-13. (Li Yitian, Xue Juli, Sun Zhaohua, et al. Channel degradation and river stage variations in reaches downstream of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(4): 1-13. (in Chinese))

[3] 胡春宏, 方春明, 史红玲. 三峡工程重大泥沙问题研究进展[J]. 中国水利, 2023(19): 10-16. (Hu Chunhong, Fang Chunming, Shi Hongling. Recent progress in sediment research of the Three Gorges Project [J]. China Water Resources, 2023(19): 10-16. (in Chinese))

[4] 毛北平, 吴忠明, 梅军亚, 等. 三峡工程蓄水以来长江与洞庭湖汇流关系变化[J]. 水力发电学报, 2013, 32(5): 48-57. (Mao Beiping, Wu Zhongming, Mei Junya, et al. Confluence relationship changes of Yangtze River and Dongting Lake since impoundment of Three Gorges project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(5): 48-57. (in Chinese))

[5] 张冬冬, 戴明龙, 陈玺, 等. 荆江河段地形变化对洞庭湖水文情势的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 71-80. (Zhang Dongdong, Dai Minglong, Chen Xi, et al. Influences of topographical change of Jingjiang reach on hydrological situation of Dongting Lake [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 71-80. (in Chinese))

[6] Zhu Boyuan, Qin Jianhao, Li Yitian, et al. Impact of water-sediment diversion and afflux on erosion-deposition in the Luoshan-Hankou reach, middle Yangtze River, China [J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128110.

[7] Zhou Meirong, Xia Junqiang, Cheng Yifei, et al. Long-distance recovery of nonuniform suspended load in the Middle Yangtze River owing to upstream damming [J]. Journal of Hydrology, 2023, 626: 130263.

[8] Deng Shanshan, Xia Junqiang, Zhou Yueyao, et al. Prediction and early-warning of bank erosion in the Middle Yangtze River, China [J]. CATENA, 2024, 242: 108105.

[9] 朱玲玲, 陈剑池, 袁晶, 等. 洞庭湖和鄱阳湖泥沙冲淤特征及三峡水库对其影响[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 348-357. (Zhu Lingling, Chen Jianchi, Yuan Jing, et al. Sediment erosion and deposition in two lakes connected

with the middle Yangtze River and the impact of Three Gorges Reservoir [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 348-357. (in Chinese))

[10] 张冬冬, 戴明龙, 徐高洪, 等. 三峡水库蓄水期洞庭湖出湖水量变化 [J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 613-622. (Zhang Dongdong, Dai Minglong, Xu Gaohong, et al. Research on change of the outflow of Dongting Lake during the refill period of the Three Gorges Reservoir [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 613-622. (in Chinese))

[11] 孙昭华, 周炜兴, 周坤, 等. 江湖水沙输移与长江中下游造床流量的关系 [J]. 水利学报, 2021, 52(5): 521-534. (Sun Zhaohua, Zhou Weixing, Zhou Kun, et al. Relationship between the characteristics of water-sediment transportation in river-lake system and the channel forming discharge of the middle and lower Yangtze River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(5): 521-534. (in Chinese))

[12] Lai X, Yin D, Finlayson B L, et al. Will river erosion below the Three Gorges Dam stop in the middle Yangtze? [J]. Journal of Hydrology, 2017, 554: 24-31.

[13] 雷声. 2020 年鄱阳湖洪水回顾与思考 [J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 7-12. (Lei Sheng. Review and reflection on Poyang Lake flood in 2020 [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 7-12. (in Chinese))

[14] 方春明, 关见朝, 史红玲. 鄱阳湖入江水道输沙能力与出湖沙量关系及冲淤调整规律 [J]. 水利学报, 2023, 54(8): 997-1004. (Fang Chunming, Guan Jianzhao, Shi Hongling. Relationship between sediment transport capacity of the Poyang Lake channel and sediment out of the lake and adjustment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(8): 997-1004. (in Chinese))

[15] 郭振天, 黄峰, 郭利丹, 等. 鄱阳湖水文情势演变原因及对策 [J]. 长江科学院院报, 2021, 38(6): 27-31. (Guo Zhentian, Huang Feng, Guo Lidan, et al. Causes and countermeasures of hydrological regime evolution in Poyang Lake [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(6): 27-31. (in Chinese))

[16] Wang Bo, Xu Y J. Decadal and episodic changes in morphology and migration of the confluence bar of two alluvial rivers in Louisiana, USA [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2020, 56(4): 615-629.

[17] Yuan Saiyu, Zhu Yunqiang, Tang Hongweu, et al. Planform evolution and hydrodynamics near the multi-channel confluence between the Yarlung Zangbo River and the delta of the Niyang River [J]. Geomorphology, 2022, 402: 108157.

[18] Zhou Weixing, Sun Zhaohua, Yang Zhonghua, et al. Confluence effects of Dongting Lake in the middle Yangtze River: discontinuous fluvial processes and their driving

- mechanisms [J]. Water Resources Research, 2025, 61 (2): e2024WR039030.
- [19] 王淑平,程和琴,郑树伟,等. 近期长江与鄱阳湖汇流河段冲淤变化与微地貌特征[J]. 泥沙研究, 2018, 43 (3): 15-20. (Wang Shuping, Cheng Heqin, Zheng Shuwei, et al. Fluvial processes and micro-topography characteristics in the Yangtze River and Poyang Lake confluence in recent years [J]. Journal of Sediment Research, 2018, 43(3): 15-20. (in Chinese))
- [20] Gualtieri C, Ianniruberto M, Filizola N. On the mixing of rivers with a difference in density: the case of the Negro/Solimões confluence, Brazil [J]. Journal of Hydrology, 2019, 578: 124029.
- [21] Horna-Munoz D, Constantinescu G, Rhoads B, et al. Density effects at a concordant bed natural river confluence[J]. Water Resources Research, 2020, 56(4): e2019WR026217.
- [22] 赵雅楠,黄国鲜,童思陈,等. 气候变化与人类活动对鄱阳湖流域入湖水沙变化的贡献率分析[J]. 水资源保护, 2025, 41 (6): 113-122. (Zhao Ya'nan, Huang Guoxian, Tong Sichen, et al. Analysis of contribution rates of climate change and human activities to changes in runoff and sediment inflow into lake in the Poyang Lake Basin[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(6): 113-122. (in Chinese))
- [23] Xia Junqiang, Deng Shanshan, Lu Jinyou, et al. Dynamic channel adjustments in the Jingjiang Reach of the Middle Yangtze River[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 22802.
- [24] Zhou Yueyao, Xia Junqiang, Deng Shanshan, et al. Bank erosion under the impacts of hydraulic erosion, river stage change and revetment protection in the Middle Yangtze River[J]. Geomorphology, 2024, 448: 109043.
- [25] 曹玉芹,夏军强,周美蓉,等. 汛期与非汛期水沙条件对黄河下游不同河段过流能力的影响[J]. 水科学进展, 2024, 35(4): 617-628. (Cao Yuqin, Xia Junqiang, Zhou Meirong, et al. Effects of flood and non-flood flow and sediment regimes on the flood discharge capacity of different reaches in the Lower Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(4): 617-628. (in Chinese))
- [26] Wen Zhichao, Lu Jun, Wan Zhanwei, et al. Thalweg migration under the collaborative changes in the hydro-sediment regime and erosion base level in the Xiaobeiganliu reach of the Middle Yellow River [J]. Journal of Geographical Sciences, 2025, 35 (7): 1516-1532.
- [27] Guo Leicheng, Su Ni, Zhu Chunyan, et al. How have the river discharges and sediment loads changed in the Changjiang River Basin downstream of the three gorges dam? [J]. Journal of Hydrology, 2018, 560: 259-274.
- [28] 费祥俊,吴保生,傅旭东. 两相非均质流输沙平衡关系及挟沙力研究[J]. 水利学报, 2015, 46(7): 757-764. (Fei Xiangjun, Wu Baosheng, Fu Xudong. Equilibrium sediment transport relation and sediment carrying capacity of two-phase heterogeneous flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(7): 757-764. (in Chinese))
- [29] 夏军强,戈向阳,周美蓉. 河段挟沙力计算方法及其在黄河下游的应用[J]. 人民黄河, 2023, 45(9): 12-17. (Xia Junqiang, Ge Xiangyang, Zhou Meirong. Method for calculating the reach-scale sediment transport capacity and its application in the lower Yellow River [J]. Yellow River, 2023, 45(9): 12-17. (in Chinese))
- [30] Wu R B, Yang J C. An analytical method of stage-fall-discharge rating [J]. Hydrological Processes, 2008, 22 (16): 2959-2973.
- [31] Heydari S, Tainio M, Woodcock J, et al. Estimating traffic contribution to particulate matter concentration in urban areas using a multilevel Bayesian meta-regression approach [J]. Environment International, 2020, 141: 105800.
- [32] 王庆明,张越,窦鹏,等. 1985—2020 年京津冀平原水面面积演变特征及归因分析[J]. 水利学报, 2023, 54 (4): 451-460. (Wang Qingming, Zhang Yue, Dou Peng, et al. Evolution law of water surface area in the Beijing-Tianjin-Hebei plain from 1985 to 2020 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54 (4): 451-460. (in Chinese))

(收稿日期:2025-08-03 编辑:王芳)

