

# 沙颍河周口-界首河段通航条件分析及洪水模拟研究

毛记康<sup>1</sup>, 刘明潇<sup>2</sup>, 杨超<sup>3</sup>, 张潼<sup>1</sup>, 代宏飞<sup>2</sup>, 边疆<sup>4</sup>

(1.河南省中工设计研究院集团股份有限公司,河南 郑州 450003; 2.华北水利水电大学,河南 郑州 450046; 3.河南中豫国际港务集团有限公司,河南 郑州 450016; 4.河南中浩信息科技有限公司,河南 郑州 450000)

**摘要:**【目的】内河航运环境污染小、运输成本低,水系连通又能实现通江达海,具有良好的发展前景。对于丰枯差异较大的平原河流,通航条件受水文泥沙及河流工程影响,很有必要对内河通航安全制约因素及河流洪水影响开展研究,为提升河流航运能力与防洪安全服务。【方法】选取沙颍河下游周口至界首河段为典型研究对象,采用随船调查、河床演变分析与水沙数值模拟相结合的方法,分析河段通航制约条件,研究洪水及冲淤对航运的影响。【结果】该河段河型弯曲、跨河桥梁众多,经河道整治与2级船闸调控,目前基本满足III级航道要求;但处于急弯段桥梁的上下游航道尚需拓宽,过渡段航深略显不足。河道堤防满足20年一遇洪水设防要求,50年一遇洪水时堤防有22处高风险段;洪水期城区桥梁净空只能通行50~100t级船只,其他河段可通行1000t级船只;洪水流速有超2.3m/s的弯道段斜向流对行船有一定影响,模拟洪水河床冲淤幅度小于0.35m,以冲刷为主。【结论】研究河段满足通航要求,但局部河段航道需改善,凹入式港池应注意回流淤积,洪水期高水位会影响堤防安全与桥梁通航条件;研究成果可为沙颍河及类似河段航道规划与建设提供技术支持,助力沙颍河高等级航道与河南现代水网建设。

**关键词:** 沙颍河;通航条件;水文情势;典型洪水;数值模拟;河床冲淤

**中图分类号:** TV122

**文献标识码:** A

随着社会经济快速发展,交通运输的需求日益剧增。内河航运环境污染小、基础设施建设占地少、运输成本低、适于开展规模化运输;同时内河航运依托水网建设具有通江达海的条件,是区域发展的重要战略资源<sup>[1]</sup>。我国的内河航道通航里程居世界第一,但高等级航道通达范围不足、网络化程度不高,制约了内河航运的可持续、高质量发展<sup>[2-3]</sup>。对于水资源相对短缺地区,河流枯水期与洪水期流量相差很大,内河航运受自然径流影响,对通航条件形成一定制约,了解河流洪枯特性及对通航的影响十分必要。

在内河航运与河流洪水研究中多采用数值模拟、模型试验以及河床演变分析的方法。在河流水沙数值模拟方面,岳志远等<sup>[4]</sup>提出WAFTVD二阶数值方法,较好模拟了河流洪水演进及冲淤。丁赞等<sup>[5]</sup>认为水流运动与河床变形之间耦合机理复杂,河床冲淤对水流的干扰呈正变关系,构建水

沙数学模型时推移质和悬移质均需考虑。刘臣等<sup>[6]</sup>建立拟合坐标系下的平面二维模型,模拟河流洪水演进,对影响通航条件的航宽、航深、险滩、航线流速等因素进行研究,提出了航道整治措施和整治后的效果。

借助物理模型试验,李焱等<sup>[7]</sup>研究了不同航速条件单线通航渠道合理尺寸,丁越峰研究指出通过建设护岸工程可以稳定河势与航道,保障改建期通航安全<sup>[8]</sup>。冲积性平原河流大多迂回曲折,顺直河段常有浅滩碍航,弯道段常有横向斜流影响通航安全,需要采取导流墩等措施改善流态<sup>[9]</sup>。另外,在河流城区段多有连续桥群,其对通航的影响引起研究者重视,连续桥群影响主要体现在桥梁通航净空高与净宽、桥梁间距以及桥轴线与主流夹角等方面,应当在航速、航向和船位控制3个要素上采取针对性航运管理措施<sup>[10]</sup>。洪枯差异较大的河流为了保证最低通航水位和通航保证率

收稿日期/Received:2025-5-26

修回日期/Revised:2025-9-28

基金项目:河南省交通运输厅科技项目(2023-3-3);国家自然科学基金联合基金(U2243220)。

第一作者:毛记康(1993—),男,工程师,硕士,从事智慧交通方面的研究。E-mail:229323213@qq.com。

通信作者:刘明潇(1986—),女,副教授,博导,博士,从事航道工程与航运技术方面的研究。E-mail:liumingxiao@ncwu.edu.cn。

需要设置船闸:非汛期通过水力调控保持航道水深,控制过船;汛期开闸敞泄,不影响洪水行洪。考虑到船只进出顺畅,船闸应布置在河流的平顺过渡段,同时应采取综合工程措施与合理的运行调度方案防治泥沙淤积<sup>[1]</sup>。

沙颍河是淮河最大的支流,上游处于山丘区,河道陡峻、产汇流快、洪峰陡峻;进入平原地区后河道比降变缓、泄流能力降低,解放前洪水经常漫溢河堤。流域受季风影响明显,易形成特大暴雨洪水(如“75·8”特大洪水),同时枯水季节流量很小。沙颍河中下游是重要的通航河流,周口-省界河段有较长的水运历史;但河道与水文特性给航运带来很多不稳定因素。王国营、曹辉等<sup>[12,13]</sup>对沙颍河航运瓶颈及航道设计关键技术进行剖析,指出河道深泓线凹凸不平、河道曲折多湾、沿线桥梁众多、丰枯差异巨大,是航运发展的制约因素。任恒杰、任慧敏以沙颍河和周口港为研究对象,就沙颍河航运能力提升和周口港建设对产业聚集、城镇化发展的影响以及两者之间的关联性进行分析研究<sup>[14-16]</sup>。

本文选择沙颍河下游周口至界首河段为研究对象(如图 1 所示),研究方法采用随船调查、河床演变分析与洪水数值模拟相结合;分析沿线河道、桥梁、船闸的通航条件及存在问题,研究特征洪水期河流洪水位、流速分布及冲淤特性,研究洪水对堤防与通航的影响。

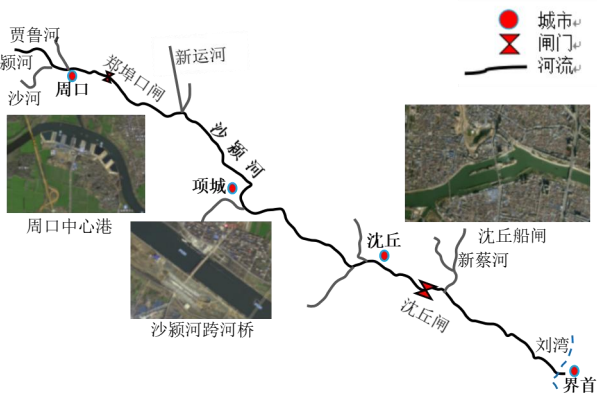


图 1 沙颍河周口-省界河段河道平面特征及主要通航建筑物分布

Fig. 1 Plane characteristics of the river channel and distribution of major navigable buildings in Zhoukou-Provincial boundary section of Shaying river

## 1 河道水沙特性与航道条件分析

### 1.1 河流及水文泥沙特性

沙颍河周口至省界河段属冲积性平原河流,总长 89 km;河道蜿蜒曲折,比降 1/10 000;河槽宽 150~200 m,两岸有多条支流汇入,较大的有新蔡河和新运河。沙颍河流域多年平均降雨量 790 mm,降水量年际变幅较大,最丰年是最枯年的 4 倍多。据 1950 年至 2025 年水文数据统计,沙颍河多年平均流量 97.2 m<sup>3</sup>/s(周口站),年平均流量及年最大流量存在波动变化,近年来总体呈减小趋势,如图 2 所示。据统计,年最大流量的波动变化很大,最丰年为最枯年的 30 倍,河道枯水流量很小,但仍有大洪水发生,如“75·8”特大洪水,周口站洪峰流量达 3 450 m<sup>3</sup>/s,洪峰水位 49.92 m,超过保证水位 0.72 m,洪水历时 6~7 h;如 2 000 年“7·15”支流澧河洪水的洪峰流量达 6 000 m<sup>3</sup>/s,大大超过下游河段过流能力。径流年内变化明显,汛期 7~10 月流量较大,12 月至来年 3 月流量很小,如图 3 所示。

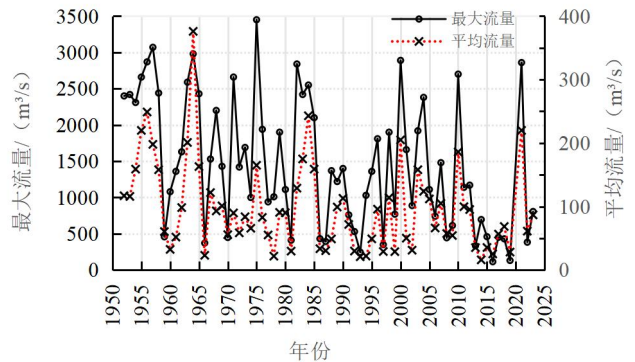


图 2 沙颍河周口站 70 年特征流量过程线  
Fig. 2 70-year characteristic flow process line of Shaying River at Zhoukou Station

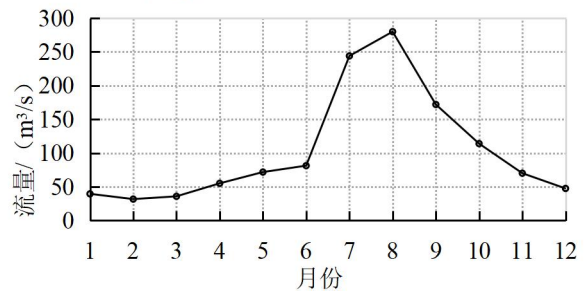


图 3 沙颍河周口站多年月平均流量

Fig. 3 Multi-year average monthly flow of Shaying river at Zhoukou station

经计算,周口站不同重现期洪水的洪峰流量与水位见表 1,表中水位为实测值,流量计算考虑了支流汇入的影响。沙颍河泥沙主要来源于周口段以上流域,随着下游河道断面的增大,水流流速变缓,大部分泥沙沿河逐渐沉积下来;非汛期河道

冲淤变化很小,沿河取水口、港池则每年都有一定数量泥沙淤积。周口站实测多年平均含沙量为 $1.57 \text{ kg/m}^3$ ,多年平均输沙率为 $147.7 \text{ kg/s}$ ;非汛期含沙量很低,而洪峰期最大含沙量曾高达 $29.2 \text{ kg/m}^3$ ,年最大输沙量为 $1170 \text{ 万 t}$ (1982年),泥沙中值粒径 $0.05 \text{ mm}$ 。河道两岸均修有堤防,防洪标准为20年一遇洪水设计,50年一遇洪水校核;沿线弯道主流顶冲处均有抛石和混凝土模袋护岸或导流短丁坝,河势相对比较稳定。

表1 沙颍河主要控制站特征洪水特征参数  
Tab.1 Measured flood characteristic parameters of main control stations of Shaying river

洪水标准	流量/( $\text{m}^3/\text{s}$ )	槐店站水位/m	备注
20年	3 250~3 850 (周口—界首)	49.95	计入沿程 两条支流 入汇流量
50年	3 750~4 630 (周口—界首)	50.63	

## 1.2 通航条件分析

沙颍河下游河床比降 $1/10\ 000$ ,非汛期水流平缓,具有较好的内河水运条件。周口—省界河段早有通航历史,经过近年航道整治、港口与航运枢纽建设,据调查目前该河段全线可以通行 $2\ 000 \text{ t}$ 级集装箱船。该段航道经过周口、项城、沈丘、界首四座城市,沿线有两座船闸、21座跨河桥梁;非汛期沿线桥梁基本能满足:直线河段桥梁单孔双向通航要求 $90 \text{ m} \times 7.0 \text{ m}$ (净宽 $\times$ 净高),双孔单向通航要求 $30 \text{ m} \times 7.0 \text{ m}$ (净宽 $\times$ 净高)。

作者乘满载集装箱船对 $89 \text{ km}$ 河段进行了沿线调研,收集了船载雷达测深记录,与船员、水文站进行了座谈,记录了沿线桥梁、码头与河道整治工程。现状航道基本满足通航要求,但也发现一些问题,通航条件分析如下。①部分处于弯曲河段或桥梁与流向夹角大于 $5^\circ$ 的桥梁河段通航条件尚需改善,集装箱船空载过桥时有些通航净空略显紧张。②目前,该河段两岸建有大小码头16座,包括新建成的大型集装箱码头(小集),码头形式多为顺岸式,也有凹入式。凹入式码头(如周口中心港)具有多建泊位,停泊条件好的特点,但易受侧向回流淤积影响;据调查,虽然沙颍河含沙量很小,但周口中心港港池每年清淤量达 $52\ 000 \text{ m}^3$ 左右,口门区淤积如不及时清除就会影响进港船只。③由于河道深泓线凹凸不平,有些弯道过渡段存在浅滩; $2\ 000 \text{ t}$ 级集装箱船重载情况下,局部过渡段船只吃水深度距河底仅 $1.0 \text{ m}$ 左右。④目前,该河段

按渠化河流IV级航道标准调节水深,具备较优的航运条件,河流水环境质量也很好;但大洪水(“75·8”洪水和“82·8”洪水)时沙颍河尚未全面通航,大洪水期的河势、堤防安全状况与通航条件目前尚不明确,因此需要对沙颍河洪水及冲淤特性开展专门研究,明确河流防洪与航运安全需求。

## 2 洪水数值模拟及航运影响分析

### 2.1 洪水泥沙模型的构建

#### 2.1.1 水沙运动控制方程

水动力模型建立在不可压缩水流运动连续方程和雷诺平均的Navier-Stokes运动方程基础上,同时遵循静水压力假设与Boussinesq近似。采用沿水深垂向积分平均,忽略垂直流向的水平横向变化,就可以获得一维水沙运动控制方程。

1)质量守恒方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

式中: $x$ 为沿流动方向的坐标; $Q$ 、 $A$ 分别为任一过流断面的流量与面积; $q$ 为沿流程的旁侧入汇流量。

2)动量平衡方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (2)$$

式中: $h$ 、 $R$ 分别为任一断面的水深和水力半径; $C$ 为反映边界阻力特性的谢才系数; $\alpha$ 为流速分布修正系数; $g$ 为重力加速度。

泥沙及河床变形控制方程

3)泥沙输移扩散方程:

$$\frac{\partial(AS)}{\partial t} + \frac{\partial(QS)}{\partial x} = \frac{\partial(Ak_x \frac{\partial S}{\partial x})}{\partial x} + \Phi_s \quad (3)$$

式中: $S$ 为水体含沙量; $k_x$ 为泥沙沿流向 $x$ 的扩散系数; $\Phi_s$ 为泥沙源汇项。式(3)反映的是一维泥沙运动规律。

4)泥沙质量守恒方程:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\varepsilon} \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

式中: $z_b$ 为河床高程; $q_s$ 为单宽输沙率; $\varepsilon$ 为沉积物的孔隙率。式(4)也称河床变形方程,适用于泥沙粒径大于 $0.042 \text{ mm}$ 的泥沙。

#### 2.1.2 基于MIKE 11的一维长河段洪水泥沙模型

由于研究河段比较长且洪水河槽相对窄深,航运条件主要关注水深与河槽流速,故本文采用MIKE 11软件中的一维水沙模型研究沙颍河特征洪水的水动力及冲淤特性。

1)Mike 11 河道文件的建立。采用 ARCGIS 从沙颍河(周口—省界)CAD 图中提取数据,将其导入 Mike 11 中生成河道平面 shp 文件,如图 4 所示。模型进口断面选取为周口市八一路大桥处,桩号 86+500 的断面;出口断面选取为沙颍河航道省界刘湾码头下游,桩号 175+500 断面,模拟河道长度 89 km。通过 Getdata 软件提取河道断面 CAD 中断面各点的坐标值,通过 Python 语言编辑断面数据导入 Mike 11 生成断面文件。典型断面如图 5 所示,包括河槽与边滩地形;模拟河段共有断面 181 个,断面间距一般约 500 m;桥梁等涉水建筑影响在断面文件中通过设置有效过流宽度、局部水头损失系数来体现。

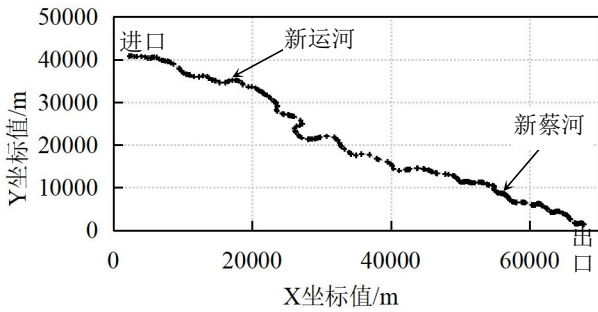


图 4 沙颍河周口-省界河段河道平面 shp 图  
Fig. 4 Shaying river Zhoukou-provincial boundary river section channel plane shp map

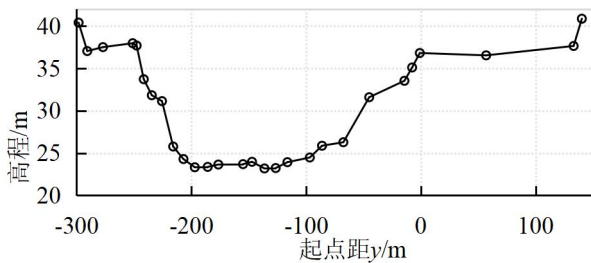


图 5 研究河段河道典型断面  
Fig.5 Typical cross-section of the reserching river

2) 模型参数设定。模型水动力模块 HD 上游开边界设置为洪水流量及其过程,下游开边界设置为水位-流量关系。考虑到模拟河段左岸距起点 17 000 m 和 72 500 m 处分别有新运河与新蔡河 2 条较大支流汇入,故在模型中设置 2 个支流汇入点(图 4);其中开边界条件为各支流流量。河床周界为固壁无滑移,水温 24 °C,无量纲紊动强度取 0.02。

泥沙模块 ST 对驱动泥沙的计算依赖于 HD 模块提供的模拟河段流速、水深、流量等水力要

素。泥沙冲淤模拟采用的是均匀沙模型,经验证选用 Van Rijn 公式,进口悬沙中值粒径为 0.05 mm,标准差为 4.2;沿程床沙中值粒径均设为 0.15 mm,标准差为 2.5。上游边界设置与洪水流量匹配的含沙量时间序列,2 个支流汇入点也采用与流量匹配的含沙量,按源项添加。

研究河段进口周口站典型洪水与含沙量过程如图 6 所示,出口刘湾断面水位流量关系如图 7 所示。

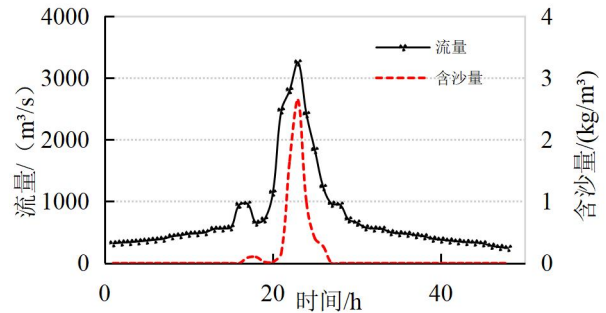


图 6 洪水(P=5%)水沙过程(周口水文站)  
Fig.6 Water-sediment processes of theflood (P=5%) in the Zhoukou hydrology station

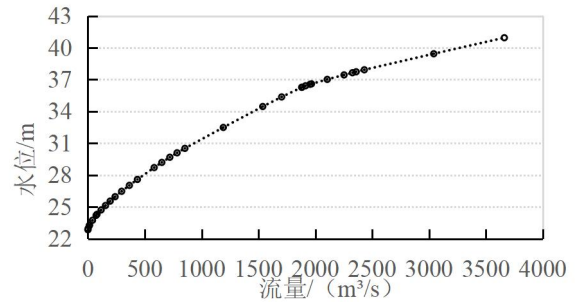


图 7 模拟河段出口水位流量关系(刘湾断面)  
Fig. 7 Water level-flow relationship in the outlet of the simulated river section

3)模型调试与验证。经多次调试后模型糙率取 0.03,计算时间步长 1 s。采用 2021 年 9 月 20 日至 30 日周口水文站实测洪水流量与含沙量过程记录资料:洪峰流量为 2 800 m<sup>3</sup>/s,对应含沙量峰值为 1.78 kg/m<sup>3</sup>。进行水流阻力相似性与含沙量的验证。图 8(a)与图 8(b)为模型验证水位与实测水位的比较,可以看到模拟河段两个测站模拟水位和实测值均比较接近,误差为 0.08~0.285 m;图 8(c)与图 8(d)为模型验证含沙量与实测含沙量的比较,可以看出两者也比较接近,误差均在 0.002~0.139 kg/m<sup>3</sup> 范围内。总体看模拟洪水位、含沙量与实测值基本吻合,表明水沙数学模型参数选择基本合理。

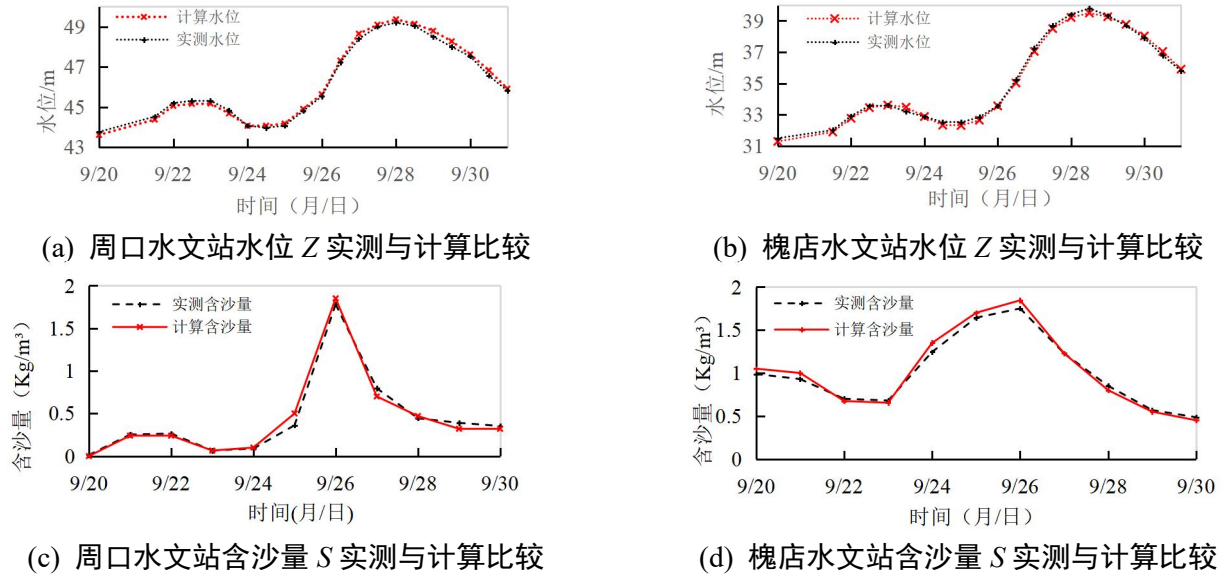


图 8 2021 年两测站验证洪水的水位(Z)、含沙量(S)实测值与计算值比较

Fig.8 Comparison of measured and calculated values for water level (Z) and sediment load (S) during the 2021 flood at two monitoring stations

## 2.2 水动力特性与通航影响分析

### 2.2.1 洪水水位(水深)及水面线分析

为了解典型洪水对研究河段防洪与航运的影响,选择设计洪水(20 年)和校核洪水(50 年)2 种工况进行洪水过程的模拟。该河段 2 种洪水洪峰时刻的水位沿程变化如图 9 所示,可知水面比降具有沿程逐渐变缓的特点,起点距  $x=30\ 000\text{ m}$  以上河段的水面比降为  $1.58\text{‰}$ , $x=30\ 000\sim 58\ 000\text{ m}$  段比降变为  $1.51\text{‰}$ , $x=58\ 000\sim 88\ 900\text{ m}$  段比降减小至  $0.761\text{‰}$ 。50 年一遇洪水水位一般比两岸堤防低  $0.5\sim 1.0\text{ m}$ ,但有 22 处局部河段水位距堤顶小于  $0.50\text{ m}$  的高风险段;20 年一遇洪水沿程水位与两

岸堤顶差值一般为  $1.0\sim 2.0\text{ m}$ ,仅有 2 处小于  $0.50\text{ m}$  (均采用较低的左岸堤比较),高风险堤段位置、左堤顶与最高洪水位的差值统计见表 2。

沙颍河深泓沿程凹凸不平,水深也沿程变化,20 年和 50 年一遇洪峰期水深分别是  $10.32\sim 21.47\text{ m}$  和  $10.64\sim 22.1\text{ m}$ ,呈沿程增大态势,航深均满足要求。根据模拟河段沿程桥梁底板高程,对比洪水洪峰期模拟洪水位,得到洪峰期沿线各桥梁的净空高度及适航条件,见表 3。数据表明,受洪峰高水位影响,周口市城区、项城和沈丘两县城区的桥梁由于净空较低,洪峰期只能适航  $50\sim 100\text{ t}$  级的船只,其他河段可通行  $1\ 000\text{ t}$  级的船只。

表 2 沙颍河(周口-省界)洪水期堤防统计高风险段

Tab.2 The dangerous sections of embankment during flooding of Shaying river

序号	断面位置 /m	堤顶高程 (左岸)/m	洪水位/m		与堤顶差值/m	
			$P=2\%$	$P=5\%$	$P=2\%$	$P=5\%$
1	0	51.111	50.851	/	0.260	/
2	500	51.176	50.816	/	0.36	/
3	1 000	51.262	50.781	/	0.481	/
4	1 500	51.148	50.766	/	0.382	/
5	2 000	51.036	50.689	/	0.347	/
6	2 500	50.885	50.685	/	0.200	/
7	3 000	50.942	50.65	/	0.292	/
8	3 500	50.854	50.569	/	0.285	/
9	4 000	50.746	50.484	/	0.262	/
10	5 000	50.505	50.276	/	0.229	/
11	5 500	50.609	50.205	/	0.404	/
12	6 000	50.458	50.110	/	0.348	/
13	6 500	50.454	50.037	/	0.417	/
14	7 000	50.286	49.902	/	0.384	/

续表

序号	断面位置 /m	堤顶高程 (左岸)/m	洪水位/m		与堤顶差值/m	
			P=2%	P=5%	P=2%	P=5%
15	7 500	50.239	49.791	/	0.448	/
16	8 000	50.100	49.786	—	0.314	—
17	8 500	50.151	49.683	—	0.468	—
18	10 000	49.858	49.375	—	0.483	—
19	10 500	49.716	49.299	—	0.417	—
20	11 000	49.703	49.237	—	0.466	—
21	22 500	47.118	47.144	46.834	-0.026	0.284
22	23 000	47.083	47.027	46.72	0.056	0.363

注：P=2%为50年一遇洪水，P=5%为20年一遇洪水。

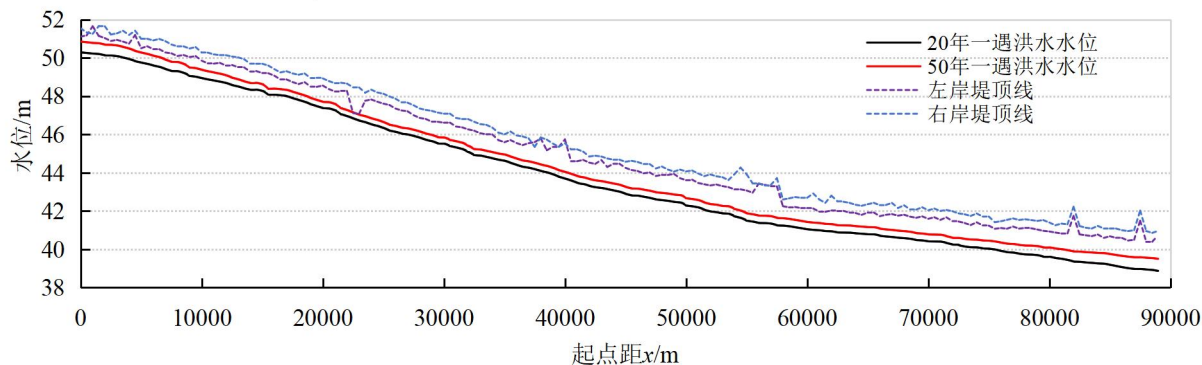


图9 20年一遇洪水和50年一遇洪水,沙颍河(周口—省界)沿程最高洪水水位及左右岸堤顶线

Fig. 9 Maximum flood level along the course of Shaying river (Zhoukou-provincial boundary) and top line of embankment on the left and right banks for flood of 1 in 20 years and 1 in 50 years

表3 沙颍河(周口—省界)洪水期桥梁通航条件统计

Tab.3 The bridge navigability conditions during flooding in Shaying river (Zhoukou-provincial boundary)

序号	桥梁名称	起点距 x/m	梁底板 高程/m	洪水位/m		通航净空/m		允许通航船/吨位	
				P=2%	P=5%	P=2%	P=5%	P=2%	P=5%
1	中州路大桥	290	50.88	49.63	49.10	1.25	1.78	<50	<50
2	八一路大桥	1 275	53.59	49.6	49.07	3.99	4.52	50—100	50—100
3	大庆路桥	2 700	53.93	49.48	48.95	4.45	4.98	50—100	100—500
4	中原路桥	4 200	56.14	49.19	48.68	6.95	7.46	100—500	100—500
5	东沙河桥	5 680	52.74	48.96	48.48	3.78	4.26	50—100	50—100
6	武胜大道桥	10 600	53.87	48.10	47.71	5.77	6.16	100—500	100—500
7	大广高速桥	17 465	53.61	47.02	46.71	6.59	6.9	100—500	100—500
8	106国道桥	30 000	52.7	44.71	44.42	7.99	8.28	500—1000	500—1000
9	宁洛高速桥	33 400	50.58	44.03	43.75	6.55	6.83	100—500	100—500
10	项城老桥	37 250	49.53	43.45	43.16	6.08	6.37	100—500	100—500
11	S102省道桥	46 150	48.95	42.12	41.82	6.83	7.13	100—500	100—500
12	颍河大道桥	58 150	50.93	40.79	40.51	10.14	10.42	1000	1000
13	沈丘沙河桥	59 450	48.16	40.68	40.41	7.48	7.75	500—1000	500—1000
14	沈丘东环桥	61 545	45.44	40.57	40.31	4.87	5.14	100—500	100—500
15	商固高速桥	68 800	52.29	40.24	40.00	12.05	12.29	1000	1000
16	漯阜铁路桥	72 070	49.43	40.00	39.77	9.43	9.66	1000	1000
17	郑阜高铁桥	79 600	49.71	39.97	38.35	9.74	11.36	1000	1000

### 2.2.2 洪峰期流速沿程变化分析

受河宽与洪水比降沿程变化影响,断面平均流速沿程变化,具有上半段波动较大、下半段变化较小的特征,见图10。P=5%洪水洪峰期,全河段平均流速约1.6 m/s,一般河段流速多在1.2 m/s左

右,个别河道相对狭窄的弯道过渡段流速达到2.2 m/s,主要在x<56 000 m河段(如21 000~26 000 m,31 800~34 000 m以及53 100~56 000 m)。

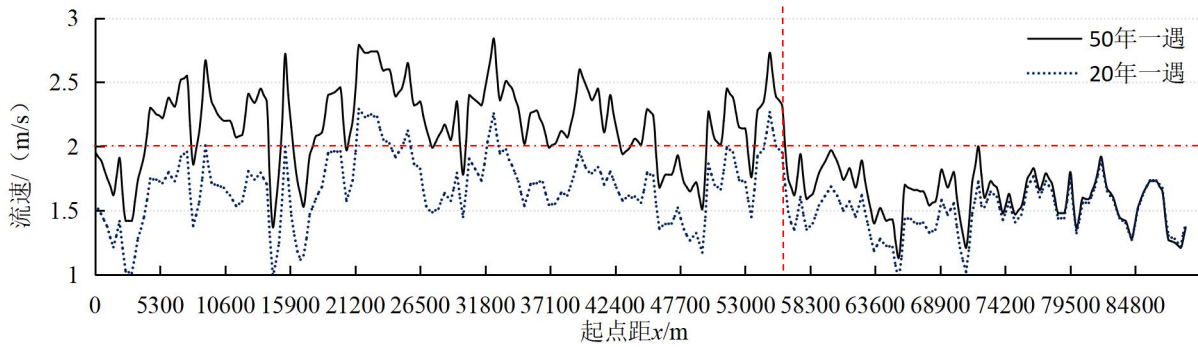


图 10 不同频率洪水洪峰期,沙颍河(周口-省界段)沿程流速分布

Fig.10 Flow Velocity Distribution Along the Shaying River (Zhoukou to Provincial Border Section) During Peak Flood Periods of Different Frequencies

根据内河通航标准(GB 50139—2014) 500 t 以上的货船在满足过桥净空时可以航行,行船经过上述河段时应注意弯道环流影响; $P=2\%$ 洪水时,平均流速接近 2.0 m/s,起点距 56 000 m 以上河段流速多在 2.0~2.3 m/s 之间,有 4~5 处局部河段流速在 2.5~2.7 m/s,水流比较湍急;1 000~2 000 t 级的货船在上述河段需谨慎行船,特别注意斜向水流冲击影响。两种特征洪水洪峰期流速沿程分布特点基本一致,下游流速偏低(图 10)。

### 2.3 河床冲淤特性及通航影响分析

由于上游水库拦蓄,沙颍河洪水一般含沙量不高。根据设计部门提供的洪水泥沙数据,按  $P=5\%$  洪水含沙量  $2.64 \text{ kg/m}^3$ 、 $P=2\%$ 洪水含沙量  $4.8 \text{ kg/m}^3$ ,进行一维长河段洪水冲淤模拟(不涉及

桥梁、码头附近局部)。冲淤结果显示:模拟河段最大冲刷达 0.35 m,最大淤积为 0.393 m,河床总体冲淤量不大,这也与沙颍河洪水水文观测数据及河床演变分析结论基本一致<sup>[17]</sup>。洪水过程中河床有冲有淤,冲淤强度不断变化;洪峰前河床以沿程冲刷为主,洪峰时全河段基本为冲刷且强度最大,洪水结束时水流强度降低,沿程有回淤,但总体还是冲大于淤。为清晰展示,这里只给出  $P=2\%$ 洪水特征时刻局部河段的冲淤变化,如图 11—12 所示,可以看出上述冲淤规律。图 13—14 分别给出了两种洪水结束时模拟河段沿程总体冲淤状况,可以看出有冲有淤但冲大于淤的特点,重点冲刷区范围为  $x=42\ 000\sim 57\ 000 \text{ m}$ ,沿程淤积一般  $<0.1 \text{ m}$ 。

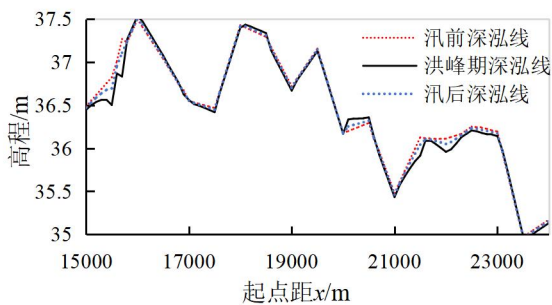


图 11 起点距 19000 附近河段冲淤变化

Fig. 11 Changes in sedimentation and scouring in the river section near the 19,000-meter mark

洪水结束时的河床冲淤分布如图 13—14 所示(红色虚线为冲淤平衡线)。由图 13—14 可看出:50 年一遇洪水结束时最大淤积厚度 0.10 m,最大冲刷深度 0.26 m,总体冲淤强度要大于 20 年一遇洪水;两类洪水都表现出河床沿程有冲有淤,但淤积量普遍小于冲刷量,全河段还是以冲刷为主的特点;模拟河段前 60 km 冲淤变化幅度较大,而后 30 km 则冲淤强度降低,全河段仍以冲刷为

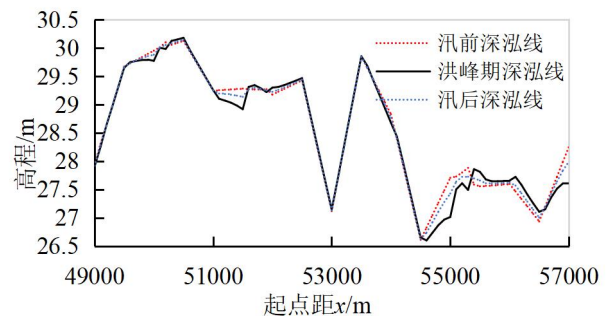


图 12 起点距 56000 附近河段冲淤变化

Fig. 12 Changes in sedimentation and scouring in the river section near the 56,000-meter mark

主;冲刷相对比较严重的渠段显示的部位基本一致,两类洪水都显示  $x=42\ 000 \text{ m}$  和  $x=56\ 000 \text{ m}$  附近河床冲刷强度比较大,是洪水期需要重点关注部位,需重视该段堤防抗冲防护,防止河势(流向)突变影响航运安全。从河床冲淤强度看,洪水对航道的影 响不大;但凹入式码头港池内的回流淤积强度一定比河床一般淤积强度大,有关港池淤积规律将在另文专述。

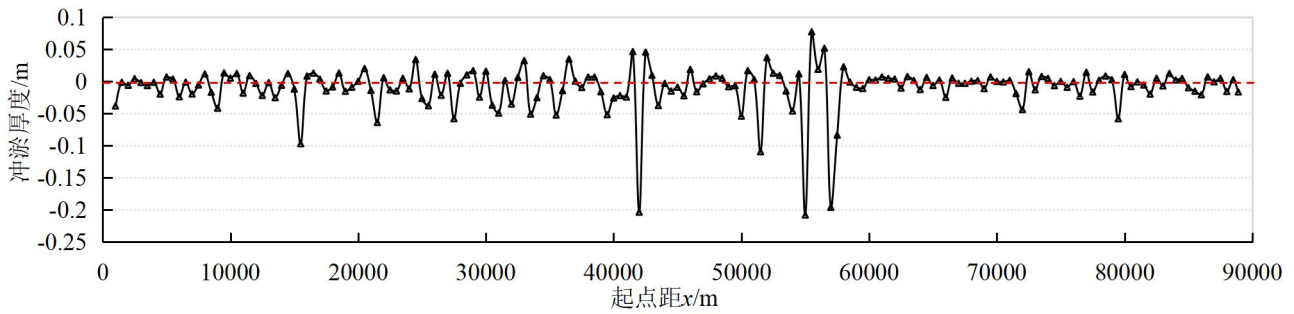


图 13 20 年一遇洪水结束后河床沿程冲淤厚度

Fig.13 Thickness of siltation along the streambed at the end of the 20-year flood

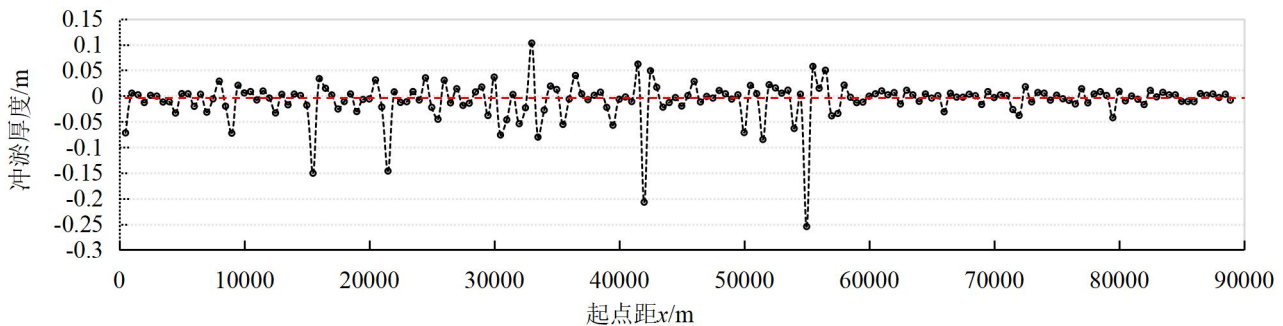


图 14 50 年一遇洪水结束后河床沿程冲淤厚度

Fig.14 Thickness of siltation along the streambed at the end of the 50-year flood

### 3 结论

1)沙颍河(周口-省界)具有良好的内河水运条件,虽然河道弯曲、跨河桥梁众多,经河道整治与水运工程建设,目前基本满足Ⅲ级航道要求。实地通航条件调查分析表明,沿线桥梁净宽、航深在非汛期均满足要求,但有些急弯道段桥梁上下游航道宽度还需拓宽改善,有利于安全双向过船。

2)采用水动力泥沙数学模型对沙颍河(周口—省界)进行了特征洪水过程的数值模拟。模拟沿程洪水位显示 20 年一遇洪水时河道堤防满足防洪要求;但 50 年一遇洪水时存在 22 处堤顶与洪峰水位低于 0.50 m 的高风险段,应注意特大洪水漫溢危险。

3)在洪水期受高水位影响,周口市、项城和沈丘县城区的桥梁净空较低,只能通行 50~100 t 级的船只,其他河段可以通行 1 000 t 级的船只;20 年一遇洪水全河段流速一般不超过 2.0 m/s;流速超过 2.0 m/s 的河段应注意斜向流对行船的影响。

4)受上游水库拦蓄影响,洪水期沙颍河整体以冲刷为主,冲淤量不大。50 年一遇洪水洪峰时刻局部河段最大冲刷为 0.35 m,最大淤积为 0.393 m;前 60 km 冲淤变化幅度较大,其中 42 km 和 56

km 处冲刷强度大,应注意防护。洪水期河床冲淤对航道影响不大,但应注意凹入式港池的回流淤积。

### 参考文献

- [1] 王晨芷,王平义,张皓锋.长江上游泸州段典型滩险航道通航水深条件研究[J].水运工程,2025(7):135-142,206.[Wang C Z,Wang P Y,Zhang H F.Study on Navigable Water Depth Conditions in a Typical Shallow and Hazardous Channel in the Luzhou Section of the Upper Yangtze River[J].Water Transport Engineering,2025(7):135-142,206.]
- [2] 李一兵.我国内河高等级航道网建设面临的问题及对策[J].水道港口,2025,46(2):157-164.[Li Y B.Issues and countermeasures in the construction of China's Inland waterway network[J]. Waterways and Ports,2025,46(2):157-164]
- [3] 徐凯,罗岚,张敏.数字化浪潮下航运数字化标准体系建设的困境与对策[J].中国水运,2023(11):5-8.[Xu K,Luo L, Zhang M. Challenges and Countermeasures in Establishing a Digital Standards System for Shipping in the Digital Age[J].China Water Transport,2023(11):5-8.]
- [4] 岳志远,曹志先,李新,等.强冲积河流过程二维水沙耦合

- 数值模拟[J].中国科学(G辑:物理学 力学 天文学),2008(8):962-972.[Yue Z Y,Cao Z X,Li X, et al. Two-dimensional numerical simulation of water-sediment coupling in high-velocity alluvial rivers[J]. Science in China (SeriesG: Physics, Mechanics, and Astronomy), 2008(8):962-972.]
- [5] 丁贇,钟德钰,张红武.冲积河流一维全沙数学模型的特征值[J].清华大学学报(自然科学版),2009,49(12):1967-1970.[Ding Y,Zhong D Y,Zhang H W.Eigenvalues of a One-Dimensional Full-Sediment Mathematical Model for Alluvial Rivers[J].Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition),2009,49(12):1967-1970.]
- [6] 刘臣,平克军,岳翠萍.那吉至鱼梁河段航道治理[J]水道港口,2006(1):23-26.[Liu C,Ping K J,Yue C P.Navigation Channel Management of the Najie to Yuliang River Section[J].Waterways and Ports,2006(1):23-26.]
- [7] 李焱,郑宝友,周华兴.构皮滩升船机中间渠道通航隧洞和渡槽的尺度研究[J].水道港口,2012,33(1):45-50.[Li Y,Zheng B Y,Zhou H X.Study on the Dimensions of the Navigation Tunnel and Aqueduct in the Intermediate Channel of the Goupitang Ship Lift[J].Waterways and Ports,2012,33(1):45-50.]
- [8] 丁越峰.内河护岸改建类工程对航道通航条件影响分析要点研究[J]中国水运,2024,24(10):84-86,95.[Ding Y F. Key Points in Analyzing the Impact of Inland River Bank Reconstruction Projects on Navigation Conditions[J]. China Water Transport,2024,24(10):84-86,95.]
- [9] 卜美飞,杨洪祥,孙保虎,等.汉江兴隆枢纽 2000 吨级二线船闸通航水流条件试验研究[J].水运工程,2025(10):122-131.[Bu M F,Yang H X, Sun B H,et al.Experimental Study on Navigation Flow Conditions for the 2,000-Ton Secondary Lock at the Xinglong Hub on the Han River[J].Water Transport Engineering, 2025(10):122-131.]
- [10] 胡优,郭湘.连续桥群河段通航条件影响分析:以湘江湘潭段为例[J].珠江水运,2024(6):54-56.[Hu Y,Guo X.Analysis of Factors Affecting Navigation Conditions in River Sections with Continuous Bridge Clusters: A Case Study of the Xiangtan Section of the Xiang River[J].Pearl River Water Transport,2024(6):54-56.]
- [11] 刘晓平,谢丽芳,蒋昌波.株洲枢纽中船闸引航道口门区淤积问题研究[J].水利学报,2001(6):86-89,95.[Liu X P,Xie L F,Jiang C B.A Study on Siltation in the Inlet Gate Area of the Middle Lock at the Zhuzhou Hub[J].Journal of Hydraulic Engineering,2001(6):86-89,95.]
- [12] 王国营,贾德栓.从 2000 年沙颍河洪水浅谈非工程防洪措施[J].河南水利,2001,30(3):6.[Wang G Y,Jia D S.A discussion on non-engineering flood control measures based on the 2000 Shaying River flood[J].Henan Water Conservancy,2001,30(3):6.]
- [13] 曹辉.沙颍河航运通道建设相关问题及对策[J].中国水运,2015(19):55-56.[Cao H.Issues and Countermeasures Regarding the Construction of the Shaying River Waterway[J].China Water Transport,2015(19):55-56.]
- [14] 任恒杰,张羽.沙颍河周口段航运发展现状及提升建议[J].中国水运(下半月),2019,19(4):35-36.[Ren H J,Zhang Y. Current Status and Recommendations for Improving Navigation on the Zhoukou Section of the Shaying River[J]. China Water Transport (Second Half-Monthly),2019,19(4):35-36.]
- [15] 柳金顶.沙颍河航道整治工程浅析[J].中国水运(下半月),2008,8(16):42-43.[Liu J D.A Brief Analysis of the Shaying River Navigation Channel Improvement Project[J]. China Water Transport (Second Half-Monthly), 2008,8(16):42-43.]
- [16] 任慧敏.周口内河航运对区域经济的影响研究[J].产业创新研究,2025(1):38-40.[Ren H M.A Study on the Impact of Inland Waterway Transportation in Zhoukou on the Regional Economy[J].Research on Industrial Innovation,2025(1):38-40.]
- [17] 苏丹.浅谈沙颍河的演变与整治[J].江淮水利科技,2014(1):13-15.[Su D. A Brief Discussion on the Evolution and Management of the Shaying River[J]. Jianghuai Water Resources Science and Technology,2014(1):13-15.]

# Analysis of Navigation Conditions and Flood Simulation Study for the Zhoukou-Jieshou Section of the Shaying River

MAO Jikang<sup>1</sup>, LIU Mingxiao<sup>2</sup>, YANG Chao<sup>3</sup>, ZHANG Tong<sup>1</sup>, DAI Hongfei<sup>2</sup>, BIAN Jiang<sup>4</sup>

(1.Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2.North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 3.Henan GOODS and MATERIALS Group Corporation, Zhengzhou 450016, China; 4.Henan Zhonghao Information Technology Co., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** **【Objective】** Inland waterway transportation offers low environmental pollution and transportation costs, while interconnected water systems enable access to rivers and seas, presenting promising development prospects. For plain rivers with significant seasonal flow variations, navigability is influenced by hydrological sediment and river engineering. It is essential to investigate factors constraining inland waterway safety and the impact of river floods to enhance navigational capacity and flood control safety. **【Methods】** The lower reaches of the Shaying River from Zhoukou to Jieshou were selected as a representative study area. Employing a combined approach of vessel-based surveys, riverbed evolution analysis, and numerical sediment transport modeling, this study analyzed the navigational constraints within the section and investigated the impacts of floods and sediment transport on shipping operations.

**【Results】** This section of the river features a meandering course and numerous bridges spanning the waterway. Following river channel improvements and regulation by a Class 2 lock, it currently meets the requirements for a Class III navigation channel; however, the navigation channels upstream and downstream of bridges located in sharp bends still need to be widened, and the water depth in the transition sections is slightly insufficient. The river embankments meet the design standards for a 20-year flood event, but there are 22 high-risk sections during a 50-year flood event; During the flood season, the clearance under urban bridges allows passage only for 50–100-ton vessels, while other sections of the river can accommodate 1,000-ton vessels; cross-currents exceeding 2.3 m/s in bends have a certain impact on vessel navigation. Simulated flood-induced riverbed scouring and deposition varies by less than 0.35 m, with scouring being the predominant process. **【Conclusion】** The studied river section meets navigation requirements, but local sections require channel improvements. Concave harbor basins should address backwater siltation, and high floodwater levels may compromise levee safety and bridge navigation conditions. These findings provide technical support for navigation planning and construction in the Shaying River and similar sections, advancing the development of high-grade waterways in the Shaying River and modern water networks in Henan Province.

**Keywords:** Shaying River, navigation conditions, hydrological situation, typical flood, numerical simulation, riverbed siltation