



异化水沙条件下汉江游荡段航道整治研究

漆炼勇¹, 李求生¹, 杨宇平²

(1. 湖北省航道工程有限公司, 湖北 武汉 430050;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 港口水工建筑技术国家工程研究中心, 天津 300456)

摘要: 自丹江口水库蓄水后, 汉江中下游游荡河段水沙条件发生显著异化, 导致航道条件稳定性变差。基于多年水库蓄水数据及碾盘山(沿山头坝址)—郑金庙河段全长110 km的实测地形资料, 系统分析该河段水沙特性变化规律、滩险碍航特点及演变趋势。结果表明, 1988—2012年该河段狮子口滩段累积冲刷量达1 272.35万 m^3 , 伴随平滩河槽持续展宽、主河槽最大刷深约10 m, 且边滩与心滩冲淤频繁, 撇弯切滩、汉道交替演变现象突出, 洲滩变化剧烈。受此影响, 航道条件极不稳定, 航槽易变且碍航问题严峻。针对性提出固滩护岸与中低水整治协同的治理原则和整治参数确定方法, 明确445 m^3/s 作为碾盘山枢纽下游设计最低通航流量。

关键词: 丹江口水库; 异化水沙条件; 碍航滩险; 航道整治

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)03-0191-08

Channel regulation in wandering reach of Hanjiang River under altered flow-sediment regimes

QI Lianyong¹, LI Qiusheng¹, YANG Yuping²

(1. Hubei Port Road Survey and Design Consulting Co., Ltd., WuHan 430050, China;

2. National Engineering Research Center for Port Hydraulic Construction Technology,
Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China)

Abstract: Since the Danjiangkou Reservoir impoundment, flow and sediment conditions in the wandering reach of the Hanjiang River's middle and lower reaches have changed significantly, weakening waterway stability. On the basis of long-term reservoir impoundment data and measured topographic data of the 110 km reach from Nianpanshan (Yanshantou Dam site) to Zhengjinmiao, we systematically analyze the variation patterns of flow-sediment characteristics, evolution trends of shoals, and navigation obstruction features in this reach. The results show that from 1988 to 2012, the Shizikou shoal section has a cumulative scouring volume of 12.7235 million m^3 , with the bank-full channel widening, the main channel scouring up to 10 m deep. Meanwhile, the side bars and mid-channel bars experiences frequent erosion and deposition; the phenomena of cutoff and alternating evolution of branched channels are prominent, leading to drastic changes in the shoals and bars. This makes waterway conditions extremely unstable, with frequent navigation channel shifts and severe hindrances. Accordingly, governance principles combining bar stabilization-bank protection with medium-low flow regulation are proposed, with a method to determine regulation parameters. The minimum designed navigable discharge downstream of the Nianpanshan Hydro-junction is determined as 445 m^3/s .

Keywords: Danjiangkou Reservoir; altered flow-sediment condition; navigation-hindering shoals; channel regulation

收稿日期: 2025-05-21 录用日期: 2025-09-02

作者简介: 漆炼勇(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为航道工程整治。

自丹江口水库投入运行后,其调控作用促使汉江中下游河段来沙量锐减,来水过程显著改变,水沙条件呈现明显异化特征,引发河床剧烈调整^[1-2]。汉江碾盘山—郑金庙河段位于汉江中游下段,作为中游游荡性河段向下游蜿蜒性河段过渡的关键区域^[3],该河段因河势稳定性差、主槽变迁频繁^[4],长期面临航道条件恶劣、整治难度大等突出问题^[5],影响航运安全畅通,成为众多学者的重点研究对象^[6-10]。

本文基于多年水文实测数据与地形资料,通过系统性分析,深入揭示汉江中下游游荡河段在异化水沙条件下的河床演变规律,阐明其碍航机理,并提出相应治理原则和整治参数确定方法,可为航道整治工程设计与通航条件优化提供科学

治理思路和工程技术指导。

1 工程概况

1.1 河道概况

研究河段位于汉江中游末端与下游首段的过渡区域,上起碾盘山(沿山头坝址),下至兴隆枢纽,全长 110 km,流经钟祥、沙洋、潜江、天门四县市,见图 1。该河段兼具游荡性与蜿蜒性河道的过渡特征:整体呈现宽窄相间的藕节状形态,其中窄段水流集中,宽段则河床宽浅、洲滩密布;同时具有典型的游荡特征,表现为流路多变、洲滩消长不定,河床宽浅散乱,属于中游游荡性过渡河段,其独特的河势演变给航道工程及航运安全带来了诸多挑战。



图 1 碾盘山—兴隆枢纽河段河势

Fig. 1 River regime from Nianpanshan to Xinglong hydro-junction

丹江口水库作为南水北调中线工程的核心水源地,其蓄水调度显著改变了汉江中下游的水沙输运过程。自水库运行后,其下游汉江碾盘山—郑金庙河段河床发生了剧烈调整,主要表现为弯道段切滩撇弯频繁、主支汉易位、心滩消长不定且流路多变,横向变形显著(河道展宽、滩槽位置多变、岸线变化剧烈,以边滩、心滩发育的弯道段与开阔段表现尤为显著,狮子口滩段弯道凸岸、石碑滩段塘港—七里湖段岸线变化尤为剧烈),深泓以刷深为主,其中狮子口和任家滩两个滩段受切滩撇弯影响深泓平面摆动幅度最大,其他位置深泓平面变化相对较小。由于游荡型河段河势稳定性差,来水来沙条件的改变会引发河段强烈的冲淤调整,主槽位置频繁变动,致使航道条件普遍较差,整治工作面临

极大挑战。因此,为改善游荡性河段航道条件,需要及时对该航道进行整治,以保障航运安全。

1.2 丹江口水库水沙特性

丹江口水库蓄水运用后,坝下河道的水沙条件发生显著改变。蓄水前(1937—1967年,部分年份实测资料缺失,下同),皇庄站多年平均最大流量为 $15\,761\text{ m}^3/\text{s}$;蓄水后(1970—2017年),该值降至 $8\,571.5\text{ m}^3/\text{s}$,较蓄水前减少 45.6%。同时,多年平均最小流量由 $285.4\text{ m}^3/\text{s}$ 增至 $522\text{ m}^3/\text{s}$,增幅达 82.9%,凸显丹江口水利枢纽对下游河段的削峰补枯效应。1937—2017年,丹江口水库蓄水前后年际间皇庄站洪枯比变化见图 2,尤其在水库蓄水后,下游河道洪枯比虽存在年际波动,但整体递减趋势显著。

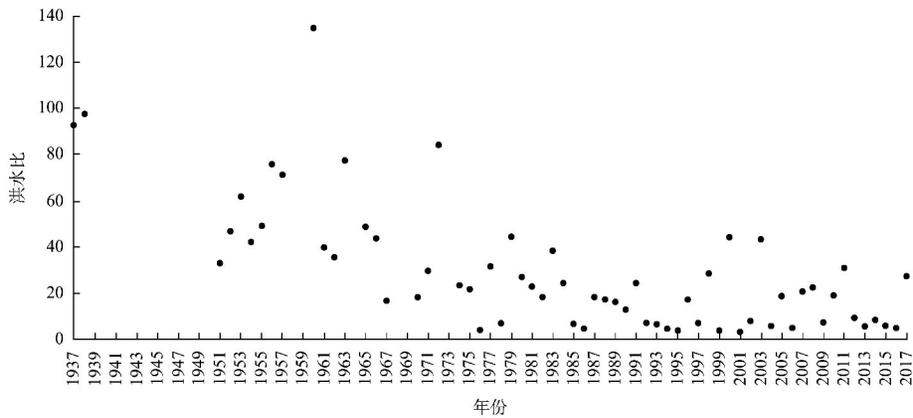


图 2 丹江口水库蓄水前后年际间洪枯比变化

Fig. 2 Interannual variations in flood-drought ratio before and after impoundment of Danjiangkou Reservoir

自丹江口水库 1967 年蓄水后, 碾盘山年输沙总量呈现显著下降趋势, 蓄水后多年平均输沙量 (1969—2017 年) 为 1 366.9 万 t, 较蓄水前 (1937—1967 年) 的 11 589.2 万 t 减少了 88.2%。1969—2017 年, 丹江口水库蓄水前后不同时期皇庄站汛期与非汛期年平均输沙量变化见图 3。其中, 丹江口水库蓄水后 1969—1985 年汛期、非汛期年平均输沙量较蓄水前分别减少了 77% 和 60%, 1986—2002 年汛期、非汛期年平均输沙量较蓄水前分别减少了 93.3% 和 83.7%, 可见水库运行后汛期平均输沙量减少的幅度和速度大于非汛期; 但对比 2003—2017 年数据, 汛期平均输沙量减少速度较之前明显放缓, 非汛期平均输沙量减少速度已略大于汛期, 预计未来汛期和非汛期输沙量较目前还将进一步减少, 不过由于当前输沙量已处于较低水平, 故后续减少幅度不会很大。

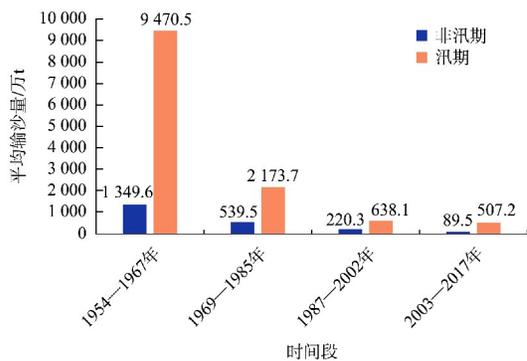


图 3 汛期、非汛期平均输沙量对比

Fig. 3 Comparison of average sediment transport between flood season and non-flood season

2 游荡性河段演变规律分析

本文选取碾盘山(沿山头坝址)—郑金庙河段 1988 年 6 月、2005 年 4 月、2007 年 10 月、2009 年 9 月、2010 年 12 月、2011 年 5 月和 2012 年 11 月共 7 次不同年份的测图, 对异化水沙条件下游荡性河段的冲淤演变规律进行对比分析。

2.1 水沙变异条件下游荡性河段的演变特点

丹江口水库建成后, 上游泥沙淤积库内, 清水下泄导致下游河道发生长距离冲刷, 河床演变特性由建库前的堆积性向侵蚀性转变。下游冲刷首先从近坝段起始, 随着近坝段逐渐达到冲淤平衡, 冲刷带逐步向下游推进。1988—2012 年监测数据显示, 丹江口水库下游各滩段普遍以冲刷为主, 其中弯曲放宽河段因河床可冲性较强, 洲滩消长与深泓线大幅摆动引发强烈冲淤变化。以狮子口滩段为例, 该河段 1988—2012 年累计冲刷量达 1 272.35 万 m³, 冲刷强度为 53 万 m³/a。

在深泓线纵向变化上(断面位置见图 4), 1988 年以来河段深泓纵向变形表现为有冲有淤、总体以冲刷为主: 1988—2005 年, 玉皇阁、狮子口、任家滩、石碑和杜家滩滩段深泓平均高程分别降低了 0.79、0.84、0.20、1.33 和 0.97 m; 2005—2012 年, 深泓纵向总体表现为冲刷, 直河口滩段弯顶断面 CS81 处大幅冲刷、最大冲刷幅度达 8 m, 玉皇阁 CS5 断面处深泓下切约 5 m, 狮子口和任家滩弯道段深泓均有所下切、平均冲刷深度约 3 m, 石碑滩段除周家嘴放宽段断面 CS26 处

有所淤积外其他断面深泓均冲刷下切、断面 CS27 下切幅度较大(深泓下切达 4.2 m); 2005—2011 年, 杜家滩滩段武荆高速公路汉江大桥附近最大下切

幅度高达 10 m, 断面 CS30 上游 650 m 最大淤积厚度约 6.2 m。

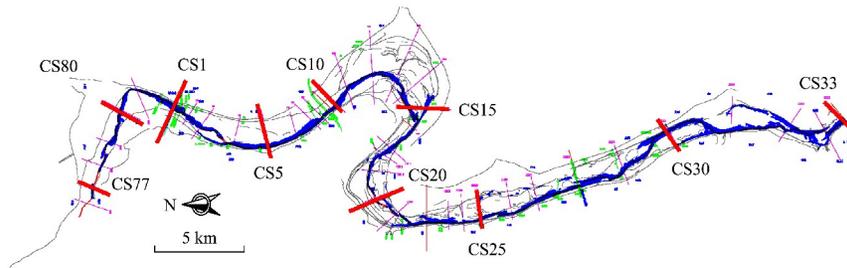


图 4 碾盘山—郑金庙河段断面位置

Fig. 4 Cross-sections in Nianpanshan-Zhengjinmiao reach

在深泓线平面变化上, 碾盘山(沿山头坝址)—郑金庙段深泓线摆动主要受洲滩冲淤变化影响, 其中狮子口和任家滩两个滩段因切滩撇弯作用导致深泓摆动幅度最大, 其余位置深泓平面变化相对较小。

碾盘山—塘港河段分布有两个反向的 S 形大弯道, 受河段内密集洲滩影响, 多年来深泓线平面位置变化显著。2005—2012 年, 狮子口与任家滩滩段深泓平面形态及滩段演变特征见图 5。2005 年, 狮子口滩段心滩淤长并与左岸相连, 深泓在狮子口弯道靠近凸岸, 顶冲狮子口心滩右侧滩尾后被逼回右岸进入流港弯道, 因流港边滩发育, 深泓又被逼向左岸、切割凸岸任家滩下行, 狮子口和任家滩滩段均发生切滩撇弯; 2007 与 2005 年相比, 狮子口滩段(断面 CS14~CS15)出现复凹现象, 深泓紧贴狮子口心滩右侧, 任家滩深泓摆动幅度较狮子口滩段小; 至 2009 年, 深泓位置无显著变化; 2010 与 2009 年相比, 狮子口、任家滩滩段深泓平面形态呈 X 形, 弯道上段冲刷凹岸边滩(复凹)、下段顶冲凸岸边滩(切滩); 2010—2011 年, 深泓摆动幅度较小; 2011—2012 年, 狮子口弯顶下段顶冲凸岸边滩(切滩), 任家滩弯顶发生复凹现象。

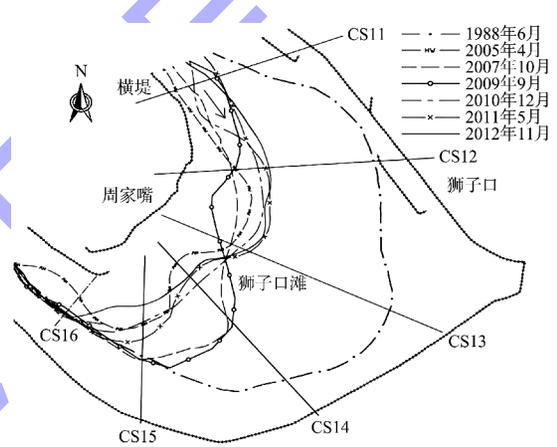


图 5 狮子口滩段切滩、复凹变化

Fig. 5 Variations in channel cutting and re-concaving at Shizikou shoal reach

塘港—郑金庙河段, 深泓出流港弯道后进入石碑附近长约 8 km 的顺直河段, 除 2005 年等个别年份外, 深泓常年沿右岸行进, 平面位置相对稳定。至石碑河段深泓开始向左岸摆动, 李家集—郑金庙河段因分布石碑滩、杜家滩等散乱洲滩, 深泓平面变化频繁剧烈: 1988 年深泓从石碑过渡至左岸并贴左岸行进, 至杜家滩后因滩体展宽摆向右岸沿坎边下行, 在殷家庙附近再次摆回左岸; 2005 年深泓切削杜家滩下部, 在郑金庙附近(断面 CS31)提前摆回左岸; 2009 年石碑—杜家滩深泓相对稳定, 杜家滩—殷家庙段摆幅较大; 2007、

2011年深泓线从郑金庙附近过渡到左岸后贴坎边下行。水流经断面CS32进入马良弯道,其附近深泓位置随羊子石滩消长而变动:1988年羊子石滩为心滩,水流分散,深泓走左槽;2005、2009年羊子石滩淤积形成右岸边滩,深泓切割边滩头部下行;2007、2011年羊子石滩冲刷复得心滩形态,较2005、2007年,深泓在弯顶上段左移、弯顶下段右移。

2.2 游荡性河段演变趋势分析

影响河道演变因素包括上游来水来沙条件、河道边界条件和下游侵蚀基准面等方面。1)在 upstream 枢纽影响方面,丹江口水库建成后,来水来沙条件呈现以下显著变化:①水库滞洪作用使洪峰削减调平,洪水历时延长;②中水流量持续时间增加,促进中水河槽塑造;③枯水流量提升,水位变幅减小;④同流量下水位下降;⑤含沙量锐减,输沙总量大幅减少。流量过程的改变叠加清水下泄,导致丹江口下游河道沿程冲刷、河床下切、河床质粗化,且河床调整自近坝段起始并逐步向下游推进。近年河床演变分析表明,受水库清水下泄影响,工程河段正处于剧烈调整阶段,目前这个过程仍在持续,表现为弯道段切滩撇弯频繁、主支汊易位、心滩与边滩消长不定、流路多变及航槽稳定性差。

2)在河道边界条件方面,碾盘山—兴隆河段,位于汉江中游河段的末段和汉江下游河段的上段,尚处于河谷盆地带,河谷由第四系全新统冲、洪积层组成,上层为滨河相砂层和河漫滩壤土黏土层,下层为卵石层,以下为第三纪砾岩、红砂岩,河床由细砂组成,中值粒径0.200~0.225 mm。

3)在下游侵蚀基准面的变化方面,兴隆水利枢纽建设改变下游侵蚀基准面,影响工程河段河床演变。水库蓄水后,库区水位抬升、比降变缓、流速减小,导致泥沙淤积。据相关报告^[11],建库前4 a累计淤积1 894万t,年均排沙比60%;至第8 a累计淤积2 165万t,年均排沙比81%;第

12 a累计淤积降至1 596万t,年均排沙比93%,整体向冲淤平衡发展,淤积形态为河道式与三角洲结合的径流式水库特征。碾盘山枢纽蓄水后,兴隆坝上68.18 km河段10 a末累计淤积厚0.19 m,40 a末达0.64 m。

本研究河段作为汉江中游宽浅散乱河段向下游弯曲河段过渡的典型区域,兼具散乱与弯曲河段特征:河槽宽浅、沙滩密布、流路多变、洲滩消长频繁,仍保留中游河段的游荡特性。南水北调中线工程实施后,来水过程将发生结构性改变,中水流量及其持续时间减少,导致洪水期淤积于浅滩的泥沙在退水期难以完成冲刷,可能引发河段累积性淤积,浅滩条件逐步恶化。兴隆水库建成蓄水后,库区水位抬升使水面比降趋缓、流速降低,工程河段内将产生一定程度的泥沙淤积。随着碾盘山水利枢纽建成,工程河段将自近坝段开始出现由近及远的冲刷过程,滩槽演变与深泓摆动可能进一步加剧,河段内浅滩水深和航道条件或难以满足规划等级要求。

南水北调中线工程、兴隆水库蓄水及碾盘山枢纽建设的叠加影响,将使该河段滩槽演变与深泓摆动更趋复杂,航道出浅风险及碍航程度显著增加。

3 水沙变异下游荡段航道整治研究

3.1 水沙异化下游荡段滩险演变及碍航特点

水沙条件异化导致下游游荡河段面临长低水历时、中水流量及其持续时间大幅缩减、来沙量显著减少的来水来沙过程改变,致使本就演变剧烈的游荡性河段在复杂边界条件与水沙条件共同作用下,逐渐由天然河道特性向人工控制特性转变。以玉皇阁—杜家滩滩段为例,丹江口水库蓄水后,尽管该河段整体游荡性有所降低,但因河床与河岸稳定性较差,仍频繁发生边滩与心滩冲刷、撇弯切滩及汊道交替演变,洲滩变化剧烈,致使深泓线横向摆动频繁、浅滩滩脊高程大幅波动,

航道条件极不稳定,航槽易变且碍航问题突出。

在水沙条件异化作用下,下游游荡河段不同滩段呈现出差异化碍航特性:弯曲段因来水不饱和、中水历时延长易引发切滩撇弯及复凹过程,如狮子口、任家滩滩段建库前水流依傍凹岸、凸岸边滩完整,建库后中水历时延长导致两弯道先后切滩撇弯、深泓大幅摆动,此过程伴随新心边滩生成、水流分散无固定航道,演变成典型汉道浅滩;两弯道间的过渡段浅滩受水沙条件较大变化影响会出现岸壁崩塌、边滩切割、心滩丛生现象,主泓年内改变,如汉江中下游石牌、杜家滩滩段建库前为复式浅滩,建库后河段改变、浅滩岸壁不稳、水流切割边滩形成低矮心滩、主泓年年改变,从复式浅滩演变成深泓摆幅大、河势较乱的散乱浅滩。总体而言,受上游水沙异化影响,坝下游河段处于不断调整阶段,弯曲段汉道移位、心边滩消长不定、流路多变、航槽不稳是其共有的滩险碍航特性。

3.2 游荡段碍航滩险的治理原则

游荡性河段航道整治应遵循以下原则:1)治理思路需要充分考虑碍航机理和影响因素,针对河床河岸稳定性较差、断面宽浅导致洲滩易变、流路散乱进而影响航道条件的特点,采取固滩护岸与中低水整治相结合的方式,以筑坝和护岸(滩)为主,固滩护岸、控制和稳定中枯水河势,束水归槽、稳定航道,达到或提高航道标准。2)航路选择应充分体现因势利导原则,对于已受异化水

沙条件长期作用的河段,整治线布置尽可能与现有中枯水航槽走向一致,顺应河道演变规律;对于频繁发生撇弯切滩、复凹且洲滩密布导致航路多变、稳定性差的宽浅弯曲散乱浅滩河段,整治线布置应靠近凸岸边滩;对于汉道段,航路应选择中洪水主流所在汉道,因其冲刷能力强于枯水水流;此外,航路设计还需要考虑南水北调后高低水历时、洪峰削减、汛后落水加快等水情变化及碾盘山枢纽施工导流、蓄水运行后近坝段强烈冲刷等对航道的影晌。

3.3 游荡性河段整治参数(设计水位)的确定方法

3.3.1 设计最高通航水位

根据 GB 50139—2014《内河通航标准》^[12],设计最高通航水位的计算需要结合下游河段的航道规划等级,选取对应的计算标准。以汉江中游游荡段为例,选取最高通航水位。

鉴于南水北调中线工程已于 2014 年 10 月实现通水,计算系列采用调水后汉江中下游皇庄、沙洋断面 1956 年 4 月—1998 年 3 月的旬平均流量演算数据。因该河段航道规划等级为 III₍₂₎ 级,根据 GB 50139—2014《内河通航标准》规定,其设计最高通航水位的计算采用 20 a 一遇洪水重现期标准。具体计算方法为:皇庄站、沙洋站断面采用洪水频率法;枢纽坝上及坝下的最高通航水位直接引用枢纽工程的研究成果;其他基本站的最高通航水位则通过上下游水位内插或水位相关性分析确定,具体数值见表 1。

表 1 调水 95 亿 m³ 后基本站设计最高通航水位结果

Tab. 1 Designed max navigable water level results at basic stations after 9.5 billion m³ diversion

站名	设计最大通航流量/(m ³ ·s ⁻¹)	设计最高通航水位/m	依据
碾盘山枢纽坝上	10 000	50.72	碾盘山枢纽预可研成果 ^[13]
碾盘山枢纽坝下	10 000	45.47	碾盘山枢纽预可研成果
皇庄	13 500	44.63	流量采用文献[14]的成果,水位采用 1956—1998 年系列计算
沙洋	12 220	38.41	流量采用文献[14]的成果,水位采用 1956—1998 年系列计算
兴隆枢纽坝上	10 000	37.80	兴隆枢纽最大通航流量及对应上游水位
兴隆枢纽坝下	10 000	37.70	兴隆枢纽最大通航流量及对应下游水位

3.3.2 设计最低通航流量

依据 GB 50139—2014《内河通航标准》, 结合航道规划等级, 采用保证率频率法计算基本站最低通航流量, 以下为汉江中游游荡段的选取情况。

皇庄站采用调水后 1956 年 4 月—1998 年 3 月的旬平均流量演算数据, 因该河段为 III₍₂₎ 级航道, 取保证率 98%、重现期 5 a, 计算得最低通航流量为 445 m³/s。碾盘山水电站推荐沿山头坝址, III 级船闸下泄最小通航量 350 m³/s, 对应下游最低通航水位 39.00 m。为确定枢纽下游设计最低通航流量, 采用平面二维非均匀沙数学模型, 以碾盘山—陈家集 16.4 km 河段为对象, 基于 2012 年 11 月地形, 选取 1991 和 2006 年典型水沙年, 分析 350 和 445 m³/s 在有无整治工程时的航道条件。无整治工程时, 350 m³/s 下航槽多处中断, 碍航严重且持续恶化; 445 m³/s 虽有改善, 但整体仍恶化。有整治工程时, 350 m³/s 仍不满足要求, 445 m³/s 则能达标。

综上, 结合相关标准, 最终选取 445 m³/s 作为碾盘山枢纽下游设计最低通航流量。

3.3.3 设计最低通航水位

设计最低通航水位的确定方法需要结合河段特征选择: 依据求得的设计最低通航流量, 在枯水期水位-流量关系曲线上可直接查得对应水位; 对于远离水位站的局部河段, 可利用瞬时水面比降观测成果, 采用比降插入法推算; 受水库回水或江湖水位顶托影响的下游河段, 则需要通过数学模型计算水面线确定。

以汉江中游游荡段(碾盘山—兴隆河段, 全长 110 km, 含两枢纽间 18.1 km 天然段与 91.9 km 水库回水影响段)为例: 天然段(沿山头坝址—狮子口横堤)的设计最低通航水位, 由图 6 查得 445 m³/s 对应的皇庄站水位为 38.45 m; 碾盘山枢纽坝下一狮子口横堤的沿程设计水位, 依据 2012 年 11 月瞬时水面比降观测数据, 采用比降插入法推算。兴隆水库回水影响段(狮子口横堤—兴隆枢纽)的设计最低通航水位, 通过长河段—维水沙数学模型计算回水水面线确定。计算以上游来流 445 m³/s、下游兴隆枢纽死水位 35.9 m 为边界条件, 得出沿

程断面水位, 结果见表 2。

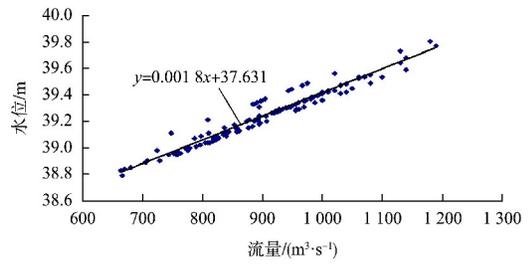


图 6 皇庄站 2010 年 11 月—2011 年 3 月水位-流量关系
Fig. 6 Water level-discharge relationship of Huangzhuang Station from November 2010 to March 2011

表 2 碾盘山—兴隆沿程设计最低通航水位计算结果
Tab. 2 Designed min navigable water level results along Nianpanshan-Xinglong Section

断面	距离/km	设计最低通航水位/m	依据
碾盘山枢纽坝下	0	38.83	根据比降内插
皇庄	7.36	38.45	皇庄站 445 m ³ /s 对应水位
狮子口横堤	18.10	37.32	根据比降内插
塘港	32.42	36.80	回水水面线计算结果(已考虑
石碑(武荆高速桥)	39.94	36.64	兴隆枢纽库尾
郑金庙	50.85	36.30	淤积对水位的影响)
马良	53.70	36.21	
沙洋	86.61	35.92	
兴隆枢纽坝上	110.00	35.90	水库死水位

4 结论

1) 丹江口水库蓄水后, 碾盘山—郑金庙游荡段来水来沙条件的异化主要表现为年径流过程不恒定度趋势性降低, 而水沙平衡度则呈趋势性大幅下降的特点, 且年内汛期水沙平衡度的下降远超非汛期, 因此汛期的冲刷调整很大程度上决定了河道冲刷调整的总态势。

2) 丹江口水库蓄水后, 碾盘山—郑金庙河段发生显著累积性冲刷, 平滩河槽展宽、主河槽刷深。伴随边滩与心滩频繁冲刷、撇弯切滩及汉道交替演变, 洲滩剧烈变化导致深泓线横向摆动频繁、浅滩滩脊高程大幅波动, 航道条件极不稳定, 航槽易变性极强且碍航问题突出。

3) 枢纽下游游荡性河段设计最低通航水位的确定可“根据枢纽运行后流量变化确定该河段的设计最低通航流量, 并考虑河床冲淤影响确定沿

程各点的设计最低通航水位”。针对河床河岸稳定性差、断面宽浅导致游荡段洲滩易变、流路散乱并影响航道条件的关键问题，需要采取固滩护岸与中低水整治协同的原则：以筑坝工程和护岸（滩）措施为核心，通过固滩护岸稳定中枯水河势，同步实施中低水位整治工程，束水归槽，实现对河势的控制与航道尺度提升，最终达到或提高航道通航标准。

参考文献：

- [1] 周耀庭. 汉江游荡性河段整治措施的概化模型试验研究[J]. 河海大学学报, 1989(5): 48-55.
ZHOU Y T. Fluvial process of Huanjiang Braided Reaches and general model experiment study on their training methods [J]. Journal of Hohai University, 1989 (5): 48-55.
- [2] 陶家元. 汉江襄涇段游荡性河道特征分析及该段河道的整治[J]. 地域研究与开发, 1988(4): 23-26, 52-63.
TAO J Y. Analysis of the characteristics and regulation of the wandering channel in Xiangkou Reach of Hanjiang River [J]. Areal research and development, 1988 (4): 23-26, 52-63.
- [3] 唐惠明, 刘一凡. 试析汉江游荡性河段的航道治理[J]. 中国水运, 1996(11): 20-22.
TANG H M, LIU Y F. Analysis on waterway regulation of the wandering reaches of the Hanjiang River [J]. China water transport, 1996(11): 20-22.
- [4] 徐金环, 李安中. 汉江中游游荡性河段滩槽演变与通航条件分析[J]. 水科学进展, 1992(4): 279-287.
XU J H, LI A Z. Study on the shoal and trough evolution and the navigation conditions of wandering reaches of the Hanjiang River [J]. Advances in water science, 1992(4): 279-287.
- [5] 常福田. 汉江游荡性河段航道整治施工顺序的研究[J]. 水运工程, 1994(1): 40-42.
CHANG F T. Study on the construction sequence of waterway regulation for the wandering reaches of the Hanjiang River [J]. Port & waterway engineering, 1994(1): 40-42.
- [6] 陆永军, 周耀庭. 汉江游荡性河段航道整治方法的研究[J]. 水道港口, 1989(3): 26-32.
LU Y J, ZHOU Y T. Study on the method for regulating the braided reaches of the Hanjiang River [J]. Journal of waterway and harbor, 1989(3): 26-32.
- [7] 李旺生, 贾锐敏, 王永成. 汉江游荡性河道航道整治计算方法研究[J]. 水道港口, 1991(2): 17-25.
LI W S, JIA R M, WANG Y C. Study on the estimating method for the braided channel regulation of Hanjiang River [J]. Journal of waterway and harbor, 1991 (2): 17-25.
- [8] 李安中, 常福田, 徐金环. 汉江红山头至雅口游荡河段的河床演变与航道整治[J]. 水利学报, 1993(5): 23-31.
LI A Z, CHANG F T, XU J H. Channel evolution and regulation of wandering reach between Hongshintou and Yakou on Hanjiang River [J]. Journal of hydraulic engineering, 1993(5): 23-31.
- [9] 许炯心, 师长兴. 汉江丹江口水库下游游荡段河岸侵蚀及其在河床调整中的意义[J]. 科学通报, 1995(18): 1689-1692.
XU J X, SHI C X. Bank erosion in the wandering reach downstream of Hanjiang River's Danjiangkou Reservoir and its role in riverbed adjustment [J]. Chinese science bulletin, 1995(18): 1689-1692.
- [10] 田月华. 汉江游荡性河段河床演变规律分析及整治原则的初探[J]. 水运工程, 1991(12): 27-33.
TIAN Y H. Analysis on the law of riverbed evolution and preliminary study on regulation principles of the wandering reaches of the Hanjiang River [J]. Port & waterway engineering, 1991(12): 27-33.
- [11] 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院. 南水北调中线工程汉江兴隆水利枢纽初步设计报告[R]. 武汉: 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 2008.
Changjiang Survey, Planning, Design, and Research Institute. Preliminary design report of the Xinglong water control project on the Hanjiang River for the middle route of the south-to-north water diversion project [R]. Wuhan: Changjiang Survey, Planning, Design, and Research Institute, 2008.
- [12] 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Navigation standard for inland waterways: GB 50139-2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.