基于地质地貌因素的重庆—丰都段航道尺度与三峡水运新通道适配性研究*

刘千盛，陈　希
（长江重庆航运工程勘察设计院，重庆 401147）

摘要：为适配长江三峡水运新通道 6.0 m 水深的通航需求，以重庆—丰都 174 km 河段为研究对象，基于川东平行岭谷背斜成山、向斜成谷的地貌格局，将河段划分为峡谷-宽谷相间型与连续宽谷型两类地貌单元，采用地质分析与航道测图定量核查相结合的方法，研究静态航道尺度的空间分异特征及成因，分析地貌对水沙过程与水流条件的控制机理，提出相应航道尺度提升对策。结果表明：静态航道尺度适配性呈“上段密集、下段稀疏”的显著差异，99%的碍航浅区集中于上段的峡谷-宽谷相间段，主要受峡谷区的基岩约束与宽谷区的堆积体挤压共同控制，下段的连续宽谷段静态航道条件总体良好；地貌单元主导了不同的水沙过程与河床冲淤模式，进而影响航道的动态演变与水流条件；基于地质地貌与碍航的对应关系，针对 3 类不同类型航道提出了分类整治思路，可为长江上游航道的建设维护提供科学依据。

关键词：三峡水运新通道；航道尺度；地质地貌；尺度适配性；川东平行岭谷
中图分类号：U617　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)09-0112-09

Research on adaptability between waterway dimensions of the Chongqing−Fengdu reach and the Three Gorges New Waterway based on geological and geomorphological factors

LIU Qiansheng, CHEN Xi
(Chongqing Shipping Engineering Survey and Design Institute of the Yangtze River, Chongqing 401147, China)

Abstract: To accommodate the 6.0 m navigation depth requirement of the Three Gorges New Waterway on the Yangtze River, a 174 km reach from Chongqing to Fengdu is taken as the research object. Based on the landform pattern of anticline-formed mountains and syncline-formed valleys in the eastern Sichuan parallel ridge-valley geomorphology, the reach is divided into alternating canyon-wide valleys and continuous wide valleys geomorphic units. This research adopts the method of combining geological analysis with quantitative verification of channel mapping to investigate the spatial differentiation characteristics and formation mechanisms of static waterway dimensions, analyzes the control mechanism of geomorphology on flow-sediment processes and flow conditions, and proposes corresponding countermeasures for waterway dimension upgrading. The results show that the adaptability of static waterway dimensions presents a significant difference of “dense in the upper reach and sparse in the lower reach”, with 99% of shallow navigation-obstructing zones concentrated in the upper alternating canyon-wide valley reach. This pattern is jointly controlled by bedrock constraints in canyon sections and deposit compression in wide valley sections, while the lower continuous wide valley reach presents generally favorable static waterway conditions. Geomorphic units dominate distinct flow-sediment processes and riverbed erosion-deposition patterns, further affecting the dynamic evolution and flow conditions of the waterway. Based on the correlation between geological geomorphology and navigation obstruction, classified regulation strategies for three channel types are put forward, providing a scientific basis for waterway construction and maintenance in the upper Yangtze River.

Keywords: Three Gorges New Waterway; waterway dimensions; geology and geomorphology; adaptability of waterway dimensions; parallel ridge-valley terrain of eastern Sichuan

收稿日期：2026-01-22　　**录用日期：**2026-04-23
***基金项目：**长江上游生态航道保护及生境修复技术与示范项目(2024YFC3212500)
作者简介：刘千盛(1992—)，男，工程师，从事港口航道设计与咨询工作。

水运工程

长江干线作为我国横贯东西、辐射南北的黄金水道，三峡枢纽是长江中上游航运体系的核心枢纽节点，在区域发展总体格局中具有重要的战略地位[1-3]。目前，三峡大坝以上库区段的全年航道维护水深为 3.5～5.5 m。随着三峡水运新通道的推进，航道设计代表船型尺度为 130 m×22 m×5.5 m(长×宽×吃水)，综合考虑富余水深要求后，航道通航水深需提升至 6.0 m。现状重庆—丰都段航道受地形地貌、地质岩性和地质构造等因素的制约，形成典型的峡谷河段和宽谷河段，峡谷河段水位深且航宽窄，宽谷河段流速缓、水位浅、礁石多、河床极其不规则，航道尺度尚不能完全适应新通道代表船型的通航需求，影响长江黄金水道综合效益的发挥。因此，有必要充分认识航道资源与地质地貌因素的关系，为系统制定科学合理的航道尺度提升措施和方案提供必要的基础资料。

国内外学者关于航道尺度提升与适配性的研究陆续开展，形成了较为丰富的理论成果与工程实践经验。李文杰等[4]以长江叙渝段为对象，采用改进的稳定航深法对航道最大开发尺度进行估算，揭示了水文条件与河相关系对航道水深的控制作用；祖福兴等[5]以嘉陵江温塘峡—观音峡两峡间宽谷河段为对象，分析了峡谷-宽谷相间地貌下连续滩险群的碍航特征与形成机理，提出了上下兼顾、统筹全河段的整治思路；周敬林等[6]结合数学模型对乌江两坝间弯曲放宽-狭窄相间河段开展了航道研究，指出河道地貌形态与枢纽水文情势的叠加作用是山区两坝间河段航道尺度提升的难点；姚金炳等[7]以金沙江向家坝库尾河段为研究对象，通过水流数学模型与实船适航试验相结合的方法，认为岩质河床的地貌约束是山区河流急险滩形成的重要原因，并提出了相应的整治方法；史卿等[8]针对南京长江大桥以上港区河段，系统论证航道通航尺度的需求目标，开展了现状航道尺度的适应性评价并提出优化对策；仲伟斌[9]针对长江下游湖口至浏河口段支汊航道，开展航道技术等级与尺度研究，提出了支汊航道尺度确定的基本原则与方法，其研究成果主要应用于下游冲积性分汊河道；袁鹏等[10]等针对平陆运河限制性航道，系统开展了航道主尺度论证，但该研究对象为人工开挖运河，对天然河道地质地貌约束下的航道尺度适配性研究不足。

综上，当前关于航道尺度的研究多集中于水文情势变化、航道尺寸整治技术、通航需求适应性及特定河段的航道开发潜力等方面，而对控制河道形态长期格局与稳定边界的地质地貌基础性因素研究较少。研究河段横跨典型的川东平行岭谷构造地貌区，其独特的“背斜成山、向斜成谷”地质格局对河道形态具有决定性影响。因此，本文从地质地貌因素出发，系统分析重庆—丰都段航道尺度与三峡水运新通道需求的适配性，研究航道尺度适配性分布的地质成因，旨在为航道整治工程的地质适配性研究与岩土工程实践提供科学依据。

1　河道概况及区域地质地貌背景

1.1　河道概况

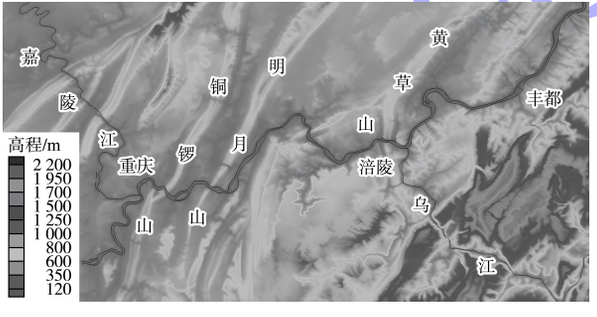
重庆(寸滩)—丰都河段全长 174 km，以涪陵李渡为界，分为重庆—涪陵李渡河段 106.4 km、涪陵李渡—丰都河段 67.6 km。其中，重庆—涪陵李渡河段属典型山区河流，河床以基岩与卵石为主，河床稳定但平面形态复杂，岸边石梁突嘴林立，江中礁石密布，常产生泡水、漩涡、横流等不良流态。河段河床起伏大、宽窄相间，深槽与浅滩交替出现，分布有铜锣峡、黄草峡、明月峡等峡谷河段，洪水河宽 300～400 m，枯水河宽最窄处不足 200 m。河段现为Ⅰ级航道，经朝天门—涪陵航道整治工程后，最低维护尺度提升至 4.5 m×150 m×1 000 m。

涪陵李渡—丰都河段位于变动回水区与常年

库区衔接段，因分布多处礁石，汛期水流仍保留天然河道特征，现状为Ⅰ级航道，最小维护尺度 4.5 m×150 m×1 000 m。目前该段正在实施航道整治工程，重点清除碍航礁石、改善险滩流态，提升船舶通航安全保障能力。

1.2　区域地质地貌背景

研究河段位于长江上游地质构造第二级阶梯，地形坡度大、岩性坚硬，河道演变以向下侵蚀为主，地处川东隔挡式褶皱带，属典型的平行岭谷地貌区，见图 1。该区域在地质历史上经历强烈水平挤压，形成一系列轴向东北-西南、紧密狭窄的背斜与宽缓开阔的向斜相间排列的构造格局。坚硬、抗风化能力强的侏罗系砂岩构成背斜核部，在地表侵蚀中“背斜成山”；而相对软弱的泥岩、页岩分布于向斜轴部，易于剥蚀而“向斜成谷”。长江自西向东横切平行褶皱，塑造了研究河段泾渭分明的上、下两段地貌景观，上段范围为重庆—涪陵李渡段、下段范围为涪陵李渡—丰都段。



1985 国家高程基准。

图 1　重庆—丰都河段地貌分布

Fig. 1　Geomorphic distribution of the Chongqing-Fengdu reach

重庆—涪陵李渡段属于峡谷-宽谷相间型河道。河段长 106.4 km，长江以近似垂直的方向穿越铜锣山、明月山、黄草山等多个背斜山脉，形成侵蚀型峡谷，分别为铜锣峡、明月峡、黄草峡、剪刀峡。峡谷段特征鲜明，河谷横剖面呈 V 或 U 形，谷坡陡峻，常大于 45°，基岩多为厚层砂岩、灰岩，大面积裸露，岸线较为稳定。河床以基岩或大粒径卵石为主，抗冲性强，江面狭窄、比降大、多急弯峡谷，整体无明显河漫滩；当河流流经背斜间的向斜谷地时，则发育为堆积型宽谷。河谷横剖面宽浅，江面展宽，岸坡平缓，河漫滩与多级阶地发育。河床质以砂、卵石等松散沉积物为主，易形成大型边滩与碛坝。因此，该段峡谷与宽谷相间，江面宽窄悬殊。

涪陵李渡—丰都段属于连续宽谷型河道。自涪陵李渡以下，长江主体转入区域性的宽缓向斜构造中，河段为台地状丘陵地带，河流流向与构造线方向趋于一致。河段长 67.6 km，主要表现为较统一的宽谷地貌，构造约束显著减弱，河谷开阔、江面宽广，岸坡主要由中、强风化的砂泥岩构成，稳定性较好，坡角平均约为 10°～30°。河床多为砂卵石所覆盖，间有部分基岩组成的密集礁石、石梁与石盘分布。

2　研究方法

以适配三峡水运新通道船型为目标，确定水深、航宽两项航道尺度指标的核查标准。水深取 6.0 m，即按船型吃水 5.5 m 加富余水深 0.5 m 计算；航宽结合库区河段自然条件及船舶航行习惯，涪陵李渡以上河段按单船+船队双线通航要求取 150 m，涪陵李渡以下河段按船队+船队双线通航要求取 200 m。研究采用地质定性分析与测图定量验证相结合的方法，首先基于区域地质图、构造纲要图及遥感影像，进行地质与地貌分析，包括河段的构造线、地层岩性分布及宏观地貌类型；其次，基于最近一次地形图进行航道核查，对于全河段划分为 25 个河道核查段落，在空间上逐水道核查标准航宽对应的最小水深，并统计 6.0 m 水深下航宽不足的浅区长度。对于存在浅区的河段，将浅区空间分布与地质地貌分区进行叠加分析，识别浅区与特定地貌的对应关系；同时，结合三峡水库蓄水以来 2008—2023 年

长序列水文泥沙观测数据，定性分析不同地貌单元内河床冲淤及水流动力。

3　结果与分析

3.1　静态航道尺度适配性特征及因素分析

重庆—丰都段总长 174 km，全河段共有 13 个水道不满足 6 m 航道尺度要求。浅区空间分布呈现“上段密集、下段稀疏”的显著差异，25 个水道中 13 个存在浅区，总长度 19.8 km，占河段总长 11.4%，其中 99%的浅区集中于重庆—涪陵李渡河段，涪陵李渡—丰都河段仅菜子梁水道有 117 m 浅区。

3.1.1　重庆寸滩—涪陵李渡段(峡谷-宽谷相间型)

上段长 106.4 km，16 个水道中 12 个不满足 6 m×150 m 尺度，浅区总长 19.6 km，占全河段浅区总量的 99%。重庆—涪陵李渡河段设计最低通航水位下航道条件核查结果见表 1。由表 1 可知，寸滩、广阳坝、长叶碛、洛碛、长寿 5 个水道 6 m 等深线直接断开，洛碛、长寿等水道浅区长度超 3 km；蛮子碛、长叶碛等边滩、碛翅发育挤压主航道，导致水浅槽窄；铜田坝、洛碛等水道岸边礁石林立，束窄通航空间，部分区域 6 m 水深下有效航宽不足 60 m，远低于 150 m 核查标准。

表 1　重庆—涪陵李渡河段设计最低通航水位下航道条件核查结果

Tab. 1　Verification results of channel conditions under designed lowest navigable water level for Chongqing-Lidu(Fuling) reach

序号	水道名称	航道里程/km	设计最低通航水位/m	150 m 航宽下最小水深/m	浅区长度/m	6 m 水深下最小宽度/m
1	寸滩	650~654	157.4	4.5	2 125	0
2	铜田坝	650~646	157.4	4.5	1 170	12
3	铜锣峡	646~642	156.9	6.2	0	150
4	广阳坝	642~635	155.4~156.9	4.5	2 509	0
5	长叶碛	631~635	154.9	4.5	1 292	0
6	鱼嘴大桥	625~631	153.9~154.4	5.0	55	74
7	木洞	618~625	152.9~153.9	4.5	2 577	15
8	炉子梁	610~618	151.9~152.4	3.7	1 200	93
9	洛碛	595~610	149.4~151.9	4.5	3 092	0
10	扇沱	589~595	148.9~149.4	5.5	540	82
11	长寿	580~589	147.4~148.9	4.5	4 520	0
12	黄草峡	573~580	146.9	4.9	178	144
13	中堆	567~573	146.4	8.7	0	162
14	青岩子	560~567	145.9	4.5	380	98
15	牛屎碛	555~560	145.4	6.7	0	251
16	剪刀峡	547.6~555	145.4~144.9	6.4	0	159

注：表中设计最低通航水位高程基准采用 1985 国家高程基准。

该段为典型的峡谷-宽谷相间型河道，横向切穿多个背斜，构造约束强，其碍航原因主要可归纳为基岩控制型碍航、堆积体挤压型碍航两类[11]，典型河段摸排情况见表 2。基岩控制型碍航见于铜锣峡、黄草峡等峡谷段，坚硬基岩构成的岸壁对航道宽度形成永久性地质约束，部分因构造裂隙发育而形成的石梁或礁石群进一步侵占了有效航宽；堆积体挤压型碍航集中于洛碛、长寿等宽谷段，历史时期形成的大型边滩与碛翅(如蛮子碛、长叶碛)长期占据河道空间，导致主航槽迂回且窄浅。综合分析表明，重庆—涪陵李渡段为航道提升的核心瓶颈段落。

水运工程

表 2 典型河段摸排情况

Tab. 2 Investigation of typical reaches

序号	碍航类型	水道名称	航道条件分析
1	基岩控制型	铜锣峡	河道弯曲,形态复杂,为“哑铃”型峡谷河段，中部峡谷区长约 2.5 km，上游进口为约 90°急转弯河段。峡谷段两岸多为悬崖峭壁，河道狭窄，低水河段约 200 m，高水河宽 250~350 m；设计最低通航水位下水深超过 40 m，河床和深槽较稳定。河道两岸基岩突嘴参差不齐，左岸中段以大磨石、小磨石最为突出，右岸进口处的鸡公嘴、中段的搬针背和出口处的商王石伸出岸边较长。峡谷中段搬针背与大小磨石对峙，6 m 线最小宽度勉强达 150 m
2	基岩控制型	黄草峡	河道弯曲，宽窄相间，黄草峡峡谷位于河段中段。上段左岸莲子碛潜布江心，黑石背突嘴伸出较开；右岸巨子梁以上到明三堆，岸形大幅凹进，江面较宽。中段为弯曲型峡谷河段，长约 3 km；峡谷进口左侧有石灰窑石梁，右侧有大猪圈、老鹰石等石梁伸出；峡谷左岸有黄牛岭突嘴，右岸有老马岭突嘴石梁，两岸石嘴均伸入江中相对，河道尤为狭窄
3	堆积体挤压型	寸滩	左岸上段为寸滩港，河段中段为寸滩长江大桥。右岸为蛮子碛边滩，碛翅伸出较开，与对岸沙帽石对峙束窄航槽。蛮子碛下游紧邻黄桷滩，黄桷滩又名黑石子，系川江枯水浅滩，河床宽阔，枯水期水面宽约 300 m
4	堆积体挤压型	长叶碛	河道较弯曲。左岸大坝子卵石边滩、乌独碛潜碛、乌独石礁石等与江中门闩子暗礁对峙，目前低水位期航道仍浅、窄。长叶碛位于水葬下游右岸，为凸岸卵石边滩，碛脑与碛翅伸入河心甚开，与对岸乌独石、麻雀堆、鱼嘴等石梁突嘴束窄航槽，主航道弯曲狭窄
5	堆积体挤压型	洛碛	河道较完全，宽窄相间。上段左岸岸形较规则，自上而下分别有蒿竿口、白石墚、黔滩等石梁以及伸入江心的上洛碛边滩；江中偏右岸长约 3 km、宽 0.8 km、坝顶高程 180 m 的南坪坝伸出甚开，将河道分为左右两槽，右槽较顺直，河底高程较高。受南坪坝和下游上洛碛的夹逼作用，平面形态较为弯曲。河段中部上洛碛附近，河道微弯，碛翅突出江心，伸向右岸，与右岸褡裢石、野鸭梁等礁石形成浅窄弯槽，为枯水期著名的弯浅险槽。打梆沱至洛碛镇河道窄深，其右岸河道边滩较窄，主要为基岩组成，时有大石盘突出
6	堆积体挤压型	长寿	河道弯曲，因河床地形复杂，历来是川江著名的航行险段。左岸象鼻子、灶门子棺材石、龙舌梁等石梁突出；其下木鱼碛潜布江心，木鱼碛脑有龙溪河汇入。河心忠水碛纵卧河中，最高点高程为 153.9 m，分航槽为二，左为柴盘子，右为王家滩，且左右碛翅伸出，缩窄航槽。右岸肖家石盘伸达河心，饿狗堆、堆石子、横板石、小石盘、磨盘石等突出；其下码头碛碛面宽广，其暗翅伸过河心；之后有雷佛滩、钓鱼嘴、僧背梁等石梁伸出河心

3.1.2 涪陵李渡—丰都段(连续宽谷型)

下段长 67.6 km，静态航道尺度适配性整体良好，仅菜子梁 1 个水道存在航宽不足问题，200 m 航宽下最小水深 5.5 m，浅区长度 117 m，其余 9 个水道 6 m 水深下最小航宽均超 260 m，完全满足 200 m 航宽要求。涪陵李渡—丰都河段设计最低通航水位下航道条件核查结果见表 3。该段地形相对平顺，仅局部河段因岸线约束存在航宽临界达标情况，无大面积浅区碍航问题，河流沿区域性宽缓向斜发育，河谷初始空间较为充裕，没有连续的基岩约束，因而静态航道尺度条件显著优于上段，整体属于静态尺度适配性良好段落。

表 3 涪陵李渡—丰都河段设计最低通航水位下航道条件核查结果

Tab. 3 Verification results of channel conditions under designed lowest navigable water level for the Lidu(Fuling)-Fengdu reach

序号	水道名称	航道里程/km	设计最低通航水位/m	150 m 航宽下最小水深/m	浅区长度/m	6 m 水深下最小宽度/m
1	剪刀峡	543.0~547.6	145.4~144.9	8.8	0	270
2	涪陵	536.0~543.0	144.9	6.6	0	264
3	和尚滩	532.0~536.0	144.4	8.0*	0	290*
4	菜子梁	522.0~532.0	144.4	5.5	117	160
5	花滩	518.0~522.0	144.4	8.2	0	260
6	平绥坝	512.0~518.0	144.4	6.9	0	330
7	丝瓜碛	504.0~512.0	145.5	6.2	0	280
8	半边峡	495.0~504.0	145.5	11.5	0	270
9	观音滩	488.0~495.0	145.5	10.5	0	635
10	丰都	480.0~488.0	145.5	7.6	0	658

注：表中最小水深带“*”的为整治工程后最小水深，平绥坝及以上设计最低通航水位基准采用 1985 国家高程基准，以下采用吴淞高程基准。

菜子梁水道河道微弯，上段左岸菜子梁斜卧江中近半，石梁最高处 147.8 m，梁尾高程 143.7 m。因石梁伸入河心较开，低水位期可通航水域急剧缩窄。中段左岸大梁斜向下伸入江中，长约 250 m，石梁航槽一侧头部较高，顶部高程 155.9 m。大梁尾与南岸潜卧江中的斑鸠滩岩盘对峙，束窄航道，消落低水位期满足现行 4.5 m 维护水深的水域宽度缩窄至 200 m 左右。消落期 160 m 水位以下，大梁礁石顶部逐渐出露，但大梁的尾梁水深不足无法通航，且靠近主航槽，成为航行暗礁。下段岸线总体较为平顺，唯有左岸大渡口、二塍岩两处石盘突入江中，石盘顶部高程分别为 148.4、150.1 m，石盘前沿高程分别为 145.8、144.6 m。所在河段河道本身较为狭窄，断面呈 V 形，设计最低通航水位时江面宽度约 300 m，水深约 60 m，类似于峡谷河型。

综上所述，静态航道尺度的空间差异受控于川东平行岭谷背斜成峡、向斜成谷的构造地貌体系。上段因河流多次垂直横切紧密背斜，形成峡谷与宽谷交替的复杂河道，共同构成了航道尺度提升的地质地貌瓶颈；而下段河流顺向斜发育，河谷形态较为单一宽阔，仅菜子梁 1 个水道存在航宽不足问题，为航道提供了较为良好的静态空间条件。

3.2　地貌对水沙过程与水流条件的控制

研究河段独特的地质地貌的影响不仅决定了静态航道尺度，也影响其河道演变与水流条件。重庆—涪陵李渡段位于变动回水区中下段，河道宽窄交替，水动力条件复杂多变，自三峡库区试验性蓄水以来，河段有所淤积，近年来随着来沙大幅减少，淤积速度进一步放缓，重庆寸滩—涪陵李渡累计冲刷 0.09 亿 m^3。峡谷区水流湍急，冲刷能力强，河床以基岩或大粒径卵石为主，长期保持稳定。宽谷区为泥沙主要落淤区，呈现典型的洪淤枯冲交替模式；受三峡调度影响，汛期淤积于宽谷段的泥沙在消落期不能完全冲刷，存在卵石等粗颗粒物质的累积性淤积趋势。在航行水流条件方面，静态航道尺度核查满足的 4 个水道中，铜锣峡、中堆、剪刀峡水道均在峡谷卡口或河道收缩处，因两岸基岩、礁石对峙，汛期易产生强劲的泡漩、乱流与急流。满足 6 m 水深的航宽介于 150~162 m 之间，扣除礁石外侧乱水宽度，则有效航宽不足 150 m。

涪陵李渡—丰都段位于变动回水区和常年库区衔接段，河道开阔，三峡试验性蓄水以来，整体表现为以悬移质细沙为主的缓慢累积性淤积[12]，淤积部位主要发生在弯曲放宽、分汊放宽河段，如平绥坝—丝瓜碛河段，主槽位置相对稳定，局部淤积厚度 1~2 m，主要为悬移质淤积，近年来随着三峡入库沙量大幅减少，见图 2，使得航道淤积速度放缓，个别年份如 2013 年甚至出现冲刷。该河段水流条件受水下礁石控制突出，散布的礁石群在汛期淹没后，严重扰动水流结构。半边峡水道因岸线弯曲及水下石梁发育，产生强力的扫弯水和紊乱流态；观音滩水道的佛面滩礁石附近流速可达 5 m/s，流态极为混乱；和尚滩、菜子梁等水道则存在明显的滑梁水，导致船舶上行困难。

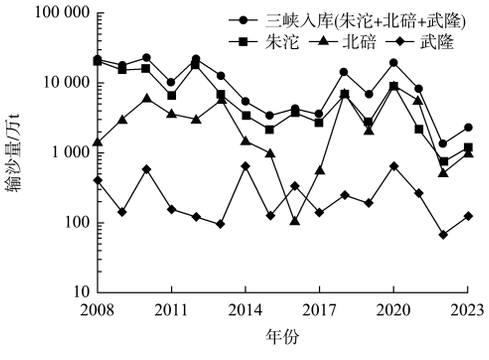


图 2　三峡输沙量年系列变化
Fig. 2　Variation of annual series of Three Gorges sediment discharge

综上，地貌单元通过控制河道形态，进而主导了水沙与水流结构，决定航道的河床演变特征与通航条件。上段的动态通航瓶颈在于空间不足且复杂流态叠加，下段则主要体现在水下礁石控流导致的汛期航行风险[13]。

4　航道尺度提升的工程对策

基于航道尺度适配性分析及其地质地貌成因，对重庆—丰都段航道提升至 6.0 m 水深的整治方

案进行初步探讨，针对不同地貌单元的主导碍航因素，采取相适应的工程措施。

4.1　基岩控制型峡谷段的整治

基岩峡谷段碍航主因是坚硬砂岩、灰岩构成的稳定岸壁对河道宽度形成约束，并由此引发的不良流态，扣除外侧乱水宽度有效航宽不足 150 m。河段的整治空间受限于稳定的地质边界，工程原则应是以拓宽航道与改善水流条件为核心，在自然边界内优化断面形态与水流结构。主要措施包括对突出的基岩、礁石群进行疏清，拓宽过水断面，增加有效航宽；同时，通过削除或改造碍航石梁，平顺河床边界，引导水流，削弱因断面急剧收缩而产生的不良流态，从而同步提升航道尺度与通航水流条件[14-15]。

典型水道为黄草峡水道，由于峡谷狭窄，有效航宽不足，且两岸基岩对峙，水流条件恶劣。提出治理思路为清除卡口处礁石水下部分，拓宽航槽并改善流态。主要建设内容为清除老马岭和黄草岭突嘴至设计低水位下 10 m，方案布置见图 3。

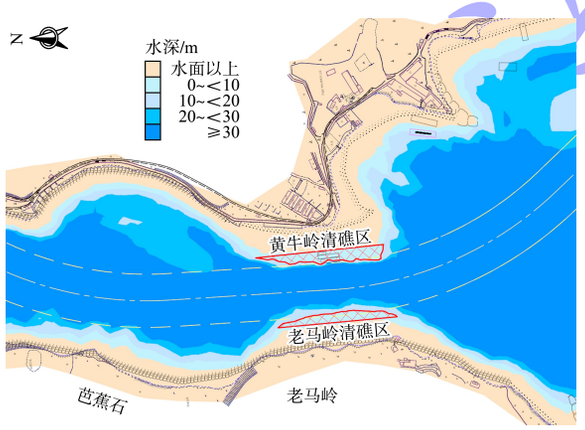


图 3　黄草峡水道工程布置

Fig. 3　Layout of Huangcaoxia waterway project

4.2　堆积体挤压型宽谷段的整治

寸滩、长叶碛、洛碛、长寿等宽谷段水道，碍航源于边滩、碛坝对主航槽的空间挤压，导致航槽浅窄。工程原则是以疏浚归槽与稳定航槽为核心，通过局部地形重塑与水流引导相结合，稳定和归顺主航槽。主要措施为采用疏浚与整治建筑物相结合，对挤压航槽的关键边滩、碛翅进行疏浚挖槽，拓展航深与航宽，并建设丁坝、顺坝等整治建筑物，束水归槽、维持挖槽稳定。

典型水道为寸滩水道，航道问题集中在蛮子碛浅滩，其碍航特性主要表现为蛮子碛碛翅伸入江中，束窄航槽，航槽内最小水深仅 4.5 m。提出其治理思路为疏浚、清礁浅区，并辅以整治建筑物束水攻沙以保持挖槽稳定。主要建设内容为：对蛮子碛浅区布置疏浚清礁工程，并在右岸布置 3 道丁(顺)坝，方案布置见图 4。

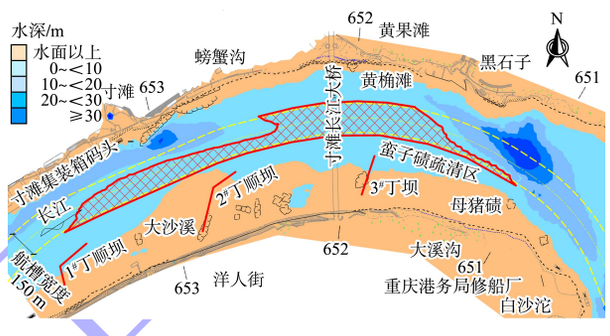


图 4　寸滩水道工程布置

Fig. 4　Layout of Cuntan waterway project

4.3　宽谷礁石密集段的整治

涪陵李渡以下河段主要为宽谷，河道宏观上通航空间较为充裕，静态水深条件总体良好。其主要碍航因素是河床岸边分布的礁石、石梁在汛期淹没过流后束窄航道，形成通航水流条件差的险滩。整治空间相对充足，以清除碍航礁石、改善通航水流条件为目的，主要措施为对散乱分布的礁石、石梁进行清除，将其顶部削低至设计通航水深以下，消除水下障碍，扩大过水断面，降低局部流速与比降，消除滑梁水、泡漩等不良流态的产生条件。

典型水道为菜子梁水道，局部满足 6 m 水深的宽度不足 200 m，汛期滩面流速急、滑梁水明显，船舶不能靠右上行。提出治理思路为清除卡口处及散乱分布的礁石，拓宽航槽的同时改善流态。主要建设内容为清除菜子梁、门闩子、大渡口、二塍岩、银锣堆等礁石至设计低水位下 10 m，归顺岸线，平顺水流，增大过水断面并减小流速，方案布置见图 5。

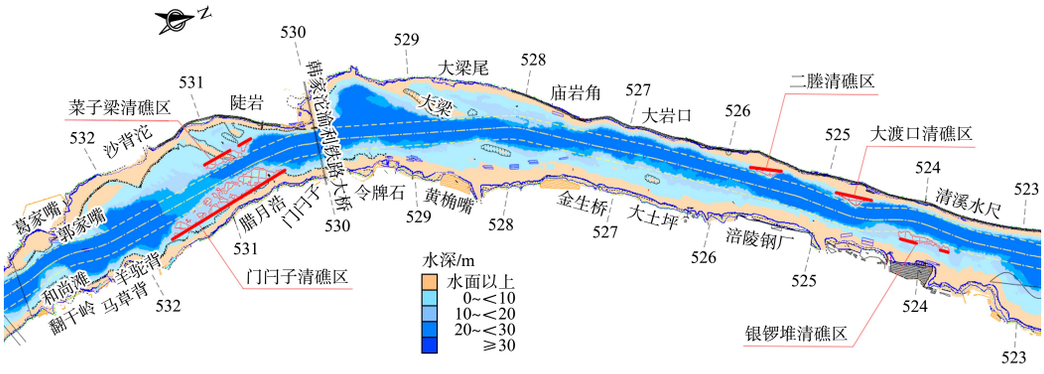


图 5　菜子梁水道工程布置

Fig. 5　Layout of Caiziliang waterway project

5　结论

1）重庆—丰都段静态航道尺度适配性呈现显著的“上段密集、下段稀疏”特征，浅区总长度 19.8 km，占河段总长 11.4%，其中 99%的浅区集中于重庆—涪陵李渡河段，涪陵李渡至丰都河段仅菜子梁水道有 117 m 浅区，静态航道尺度适配性相对较好。

2）重庆—丰都段静态航道尺度的空间分异主要受川东平行岭谷背斜成峡、向斜成谷的构造地貌格局控制，上段为峡谷与宽谷相间型河道，碍航类型为峡谷区基岩控制型、宽谷区堆积体挤压型；下段为连续宽谷型河道，河谷初始空间充裕，航道尺度条件整体适配性较好。

3）不同地貌单元控制差异化的水沙过程与水流条件，峡谷-宽谷相间段水动力复杂，呈现冲淤交替、局部粗颗粒累积性淤积的特点，连续宽谷段则以悬移质细沙缓慢淤积为主，主槽相对稳定；基于地貌与碍航对应关系，针对基岩控制型峡谷段、堆积体挤压型宽谷段、宽谷区散礁碍航段提出了分类整治的工程措施。

参考文献：

[1] 许鹏, 刘敬贤, 石好, 等. 两坝间航道与三峡水运新通道通过能力匹配研究[J]. 中国航海, 2023, 46(3): 98-104.
XU P, LIU J X, SHI H, et al. Analysis of capacity fitness of dam-to-dam waterway for the new Three Gorges channel[J]. Navigation of China, 2023, 46(3): 98-104.

[2] 长江重庆航运工程勘察设计院. 长江上游涪陵至丰都河段航道整治工程初步设计[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2022.
Chongqing Shipping Engineering Survey and Design Institute of the Yangtze River. Preliminary design of waterway regulation project from Fuling to Fengdu reach in the Upper Yangtze River[R]. Chongqing: Chongqing Shipping Engineering Survey and Design Institute of the Yangtze River, 2022.

[3] 郭生练, 王俊, 谢雨祚, 等. 面向新时期新需求的三峡水库运行方案研究[J]. 水利学报, 2024, 55(4): 379-388.
GUO S L, WANG J, XIE Y Z, et al. Three Gorges Reservoir operation scheme facing the New Era and new demands[J]. Journal of hydraulic engineering, 2024, 55(4): 379-388.

[4] 李文杰, 王皓, 龙浩, 等. 长江叙渝段航道最大开发尺度研究[J]. 水利水运工程学报, 2021(2): 20-26.
LI W J, WANG H, LONG H, et al. Study on the maximum waterway dimension of the Yibin−Chongqing reach in the Upper Yangtze River[J]. Hydro-science and engineering, 2021(2): 20-26.

[5] 祖福兴, 李洪英, 王平义. 山区河流两峡间宽谷河段航道整治研究[J]. 人民长江, 2018, 49(16): 7-13.
ZU F X, LI H Y, WANG P Y. Research on waterway regulation of strath river channel between two gorges of

Jialing River[J]. Yangtze River, 2018, 49(16): 7-13.

[6] 周敬林, 郭玉, 吕彪. 山区峡谷河流枢纽两坝间弯曲放宽-狭窄相间河段航道整治技术研究[J]. 中国水运, 2024(11): 80-82.
ZHOU J L, GUO Y, LYU B. Study on waterway regulation technology of bends-widening-narrowing alternate reach between two dams of mountain canyon river hub[J]. China water transport, 2024(11): 80-82.

[7] 姚金炳, 赵志舟. 金沙江向家坝库尾拱桥沟—佛滩河段航道整治效果分析[J]. 水运工程, 2025(11): 110-117.
YAO J B, ZHAO Z Z. Effect of channel regulation in Gongqiaogou−Fotan reaches of end section of Xiangjiaba Reservoir in Jinsha River[J]. Port & waterway engineering, 2025(11): 110-117.

[8] 史卿, 黄河清. 南京长江大桥以上南京港区河段航道通航尺度优化分析[J]. 水运工程, 2025(10): 164-170.
SHI Q, HUANG H Q. Optimization of waterway navigable dimensions in Nanjing Port section upstream of Nanjing Yangtze River Bridge [J]. Port & waterway engineering, 2025(10): 164-170.

[9] 仲伟斌. 长江下游湖口至浏河口河段支汊航道技术等级与航道尺度研究[J]. 水道港口, 2014, 35(2): 159-164.
ZHONG W B. Study on dimension and classification of tributary channel in Lower Yangtze River[J]. Journal of waterway and harbor, 2014, 35(2): 159-164.

[10] 袁鹏, 高成岩, 吴志龙. 平陆运河马道枢纽上游航道主尺度论证[J]. 水运工程, 2025(10): 132-137.
YUAN P, GAO C Y, WU Z L. Demonstration of main dimensions for upstream channel of Madao Hub in Pinglu Canal [J]. Port & waterway engineering, 2025(10): 132-137.

[11] 杨云平, 周良平, 张华庆, 等. 三峡工程运行后荆江河段分汇段航道水深资源及碍航驱动机制[J]. 湖泊科学, 2023, 35(2): 684-695.
YANG Y P, ZHOU L P, ZHANG H Q, et al. Water depth resources and driving mechanism of navigation hindrance of Jingjiang Reach watershed after Three Gorges Project operation[J]. Journal of lake sciences, 2023, 35(2): 684-695.

[12] 郑力, 刘怀汉. 三峡水库及长江上游水库群联合调度航运发展需求及潜力研究[J]. 长江技术经济, 2024, 8(4): 58-65.
ZHENG L, LIU H H. Demands and potentials of shipping development under joint regulation of Three Gorges and upstream cascade reservoirs on Yangtze River [J]. Technology and economy of Changjiang, 2024, 8(4): 58-65.

[13] 刘均卫, 刘涛. 三峡库区支流常年库区航道通航尺度研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(11): 1711-1719.
LIU J W, LIU T. Study on navigation scale of the Three Gorges Reservoir tributaries[J]. Resources and environment in the Yangtze basin, 2016, 25(11): 1711-1719.

[14] 何艳军. 长江上游九龙坡—朝天门河段航道整治工程效果分析[J]. 水运工程, 2025(2): 164-171, 224.
HE Y J. Effect analysis of channel regulation project from Jiulongpo to Chaotianmen in upper reaches of the Yangtze River [J]. Port & waterway engineering, 2025(2): 164-171, 224.

[15] 赵志舟, 张倩, 姚志豪, 等. 澜沧江马台河口滩河段航道整治方案研究[J]. 水运工程, 2025(7): 121-127, 171.
ZHAO Z Z, ZHANG Q, YAO Z H, et al. Research on channel regulation plan for Matai Estuary Beach reach of Lancang River [J]. Port & waterway engineering, 2025(7): 121-127, 171.

（本文编辑 赵娟）

水运工程