

交通部西部科技建设项目支持
南京水利科学研究院出版基金资助

SHANQU HELIU
JILIU TANXIAN

HANGDAO ZHENGZHI
JISHU YANJIU

山区河流急流滩险 | 航道整治技术研究

● 曹民雄 蔡国正 著



人民交通出版社
China Communications Press

交通部西部科技建设项目支持
南京水利科学研究院出版基金资助

SHANQU HELIU
JILIU TANXIAN

HANGDAO ZHENGZHI
JISHU YANJIU

山区河流急流滩险

航道整治技术研究

● 曹民雄 蔡国正 著



人民交通出版社

内 容 提 要

本书采用概化水槽试验、遥控自航船模上滩试验、数学模型计算及理论分析等手段,研究了山区河流急流滩险的形成条件与水力特性、船舶上滩的影响因素及动水特性,对常用的船舶阻力计算方法进行了对比与分析,提出了兹万科夫修正法和一种新的消滩水力指标确定方法——功率法,较为系统地归纳了急流滩险的整治原则与方法,以及山区河流滩险的滩性分析方法,对弯道型汊道急流滩断面开挖的整治效果进行了计算与分析。

本书可供从事航道整治设计、科研、施工和管理工作的技术人员参考,也可作为高等学校土木、水运等专业本科生、研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

山区河流急流滩险航道整治技术研究/曹民雄,蔡国正著. —北京:人民交通出版社, 2006.6
ISBN 7-114-06040-8

I. 山... II. ①曹...②蔡... III. 山区航道-航道整治-研究 IV. U617.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 061522 号

书 名: 山区河流急流滩险航道整治技术研究

著 作 者: 曹民雄 蔡国正

责任编辑: 钱悦良

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.chinasybook.com> (中国水运图书网)

销售电话: (010)85285376, 85285956

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 人民交通出版社交实书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 850×1168 1/32

印 张: 5.5

字 数: 131 千

版 次: 2006 年 7 月 第 1 版

印 次: 2006 年 7 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-114-06040-8

印 数: 0001—2000 册

定 价: 20.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



前 言

我国幅员辽阔,江河纵横,湖泊棋布。流域面积 100 平方公里以上的天然河流有 5000 多条,总长度 42 万多公里^[1]。其中山区河流主要有长江、澜沧江、珠江、闽江和富春江等水系,分布在我国东、西部各省,河流水量充沛、终年不冻。脉络交错的大小河流伸入广袤的山区腹地,连接平原的江河湖海,是我国城市和乡村、山区与沿海沟通的主要通道之一,也是维持动植物生态平衡的主要水源,对我国的经济建设和生存环境的改善起着重要的作用。

山区河流两岸有着成片的森林、丰富的矿藏和农、副、土、特产品。但山区的交通基础设施相对落后,公路建设成本很高,制约了河流两岸区域经济的发展。相比之下,发展水路运输则具有得天独厚的自然条件。因而综合开发山区河流,发展山区河流的航运事业,将促进山区经济建设的持续发展。

山区河流常因地质、地貌原因出现许多滩险,或因航道尺度不足而表现为浅滩碍航,或因水流急、比降大使得船舶无法上滩而表现为急滩碍航,或因流态恶劣使船舶无法安全航行而表现为险滩碍航,为此需要对碍航的滩险进行整治。解放以来,我国进行了大量的山区河流滩险整治工作,积累了大量的资料和丰富的经验。

已出版的《山区航道整治》与《川江航道整治》两本书,对我国山区航道整治技术进行了全面的总结,有力地推动了我国山区河流的航道建设。在此基础上,1999年颁布了《航道整治工程技术规范》(JTJ 312—98),对航道整治的设计与建设进行了规范。

我国的山区航道建设虽然取得了很大的成绩,但水运的潜力尚未充分发挥,尤其许多山区航道仍处于自然状态,有待开发整治。20世纪70年代以后,我国又相继进行了不少滩险整治,有一些新的治理经验需要进一步总结,在一些经验和共性的成果中具有进一步理论探讨的空间,因而进一步开展山区河流滩险整治技术的研究是有必要的。本书主要在前人整治经验的基础上,对急滩的水力特性,以及相关共性问题 and 整治技术进行探讨。

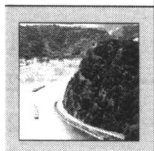
本书是在作者所承担的交通部西部交通建设科技项目“石质急流滩航道整治关键技术研究”的研究成果,和“石质汊流滩航道整治关键技术研究”中数模计算部分成果的基础上提炼与总结而成,也是作者近年来部分科研成果的总结,部分内容已在有关刊物上发表。

本书以第一作者的博士论文为基础,并得到导师张玮教授的悉心指导,也得到唐存本教授、左其华教授、马启南教授、张幸农教授、李一兵研究员、李旺生研究员的关心与帮助,以及梁应辰院士、刘书伦教授、荣天富教授、周冠伦教授、闵朝斌教授等各位老前辈的建议与指导,在此向他们表示衷心的感谢。同时也感谢家人的无私奉献和大力支持。

限于作者的水平与研究的深度,书中难免存在不妥和谬误之处,恳请读者批评指正。

作 者

2006年6月于南京



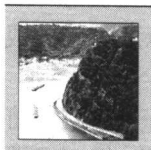
目 录

第一章 绪论	1
1.1 总结与回顾	2
1.1.1 各种滩险水力特性研究	2
1.1.2 消滩水力指标的确定	9
1.1.3 山区河流滩险整治的原则和措施研究	17
1.2 有待进一步研究的问题	23
1.2.1 各种滩险水力特性研究	23
1.2.2 消滩水力指标的确定	24
1.2.3 山区河流滩险整治的原则和措施	27
1.3 本书的主要内容	28
第二章 急流滩险的水力特性	30
2.1 急流滩的形成条件与分类	30
2.1.1 地质地貌条件	30
2.1.2 滩段的地形条件	31
2.1.3 急流滩的分类	36
2.2 急流滩段的水力特性	39
2.2.1 急流滩概化模型设计	39

2.2.2	急流滩的水力特性	42
2.2.3	局部阻力系数的确定	46
2.3	急流滩的主要流态及碍航情况	54
2.3.1	剪刀水	54
2.3.2	跌水	57
2.3.3	其他伴随的一些流态	58
2.4	本章小结	59
第三章	消滩水力指标讨论	61
3.1	船舶上滩的影响因素及动水特性	62
3.1.1	滩段地形的概化与试验水槽设计	62
3.1.2	船模设计	63
3.1.3	试验基本条件与测量位置	64
3.1.4	影响船舶上滩的主要因素	67
3.1.5	船舶上滩的动水特性	69
3.2	船舶上滩试验及阻力计算方法的对比与分析	74
3.2.1	船模上滩试验	74
3.2.2	阻力计算方法简介	76
3.2.3	对兹万科夫法的修正	79
3.2.4	计算方法的评价标准	85
3.2.5	各种计算方法的对比计算	85
3.2.6	小结	87
3.3	一种新的消滩水力指标确定方法探讨	88
3.3.1	水流功率	88
3.3.2	船舶的推力与有效功率	90
3.3.3	功率法	91
3.4	本章小结	94
第四章	石质急流滩的整治技术	96
4.1	典型的急流滩整治措施与效果分析	96
4.1.1	典型急流滩的整治情况简介	96
4.1.2	典型急流滩整治情况	106

4.2 滩性分析方法与实例	112
4.2.1 资料的收集与观测	112
4.2.2 滩性分析的主要内容与一般方法	114
4.2.3 滩性分析实例	116
4.3 急流滩的整治原则	121
4.4 急流滩整治方法和措施	125
4.4.1 扩大卡口断面	125
4.4.2 拓宽缓流航道	127
4.4.3 开槽分流或新辟航槽	128
4.4.4 筑坝壅水以减缓急流	129
4.4.5 构筑错口型滩搭跳上滩	130
4.5 本章小结	132
第五章 弯曲型汉道急流滩险的整治实例	134
5.1 典型弯曲型汉道急流滩(鲫鱼滩)概况	135
5.1.1 鲫鱼滩河势	135
5.1.2 鲫鱼滩整治	136
5.1.3 滩性分析	136
5.2 数学模型建立与验证	138
5.2.1 基本方程	138
5.2.2 方程的离散与数值求解	140
5.2.3 定解条件与计算参数确定	141
5.2.4 网格剖分	141
5.2.5 数学模型验证	142
5.3 凸岸汉道(右汉)的开挖整治	143
5.3.1 工程方案介绍	143
5.3.2 计算结果分析	144
5.4 凹岸汉道(左汉)的开挖整治	148
5.4.1 工程方案介绍	148
5.4.2 计算结果分析	148
5.5 凸、凹岸汉道的整治效果分析	152

5.6 本章小结	154
第六章 结论与展望	155
6.1 主要结论	155
6.2 研究展望	157
参考文献	158



第一章 绪论

在山区河流的各类滩险中,急流滩约为 50%^[1],因而急流滩是山区河流主要的碍航滩型之一。本书主要讨论急流滩整治的相关问题。急流滩通称急滩,是指天然河流中坡陡流急、标准船舶(或船队)自航上行困难的区段。航道上的“急流”是泛指水流急,船舶自航上滩困难的水流,不具有水力学中“急流”的含义,急滩上水流的佛汝德数 Fr 一般仅为 0.3~0.5,远小于 1。

在实际的急流滩险整治设计与建设过程中,有许多新的技术问题需要研究解决:首先应明确滩险整治的要求,需要确定消滩的水力指标,目前多凭经验确定,或者由船舶动力提出单一的流速指标;其次对急流滩的水力特性、船舶上滩的动水特性等一些基本问题应认识清楚,否则整治的措施往往针对性不强;在对这些基本问题认识的基础上,可进行滩性分析,针对不同的滩性提出相应的整治原则与措施。本书主要针对这三方面问题开展研究。



1.1 总结与回顾

1.1.1 各种滩险水力特性研究

1.1.1.1 急流滩水力特性研究

《山区航道整治》^[1]简单地描述了急流滩常见的水流流态——剪刀水、跌水等,分析了流态对船舶航行的影响,认为急流滩的成因是河床泄水断面受两岸地形、地物的影响。

《川江航道整治》^[2]对急流滩水力特性进行了进一步描述,将急流滩段分为三个特征河段:缓流段、急流段和乱流段;提到了滩段流速和比降的最大值位置。认为基岩、河道堆积物(山溪或地质因素造成的)是急流滩的基本成因。

20世纪60年代末,从川江青滩的整治试验研究中发现滩口地形测量有误,后采用浮筏水尺现场测量了滩段的水面高程,并点绘了实测水位等值线(图1.1^[3])。可见,河心水面比降较两岸边的水面比降大,右岸比降相对较小;水面高程最低点位于河心,比横断面上左岸水位低0.14m,比右岸水位低0.36m。如用两岸水位计算比降并线性内插反算滩上地形,将必然产生很大误差。

此后,有些学者^[4~8]在研究某个具体急流滩整治时,对急流滩的水力特性有所涉及,但没有较为系统的研究成果。

1.1.1.2 险滩水力特性研究

《山区航道整治》^[1]简单地描述了泡漩水、滑梁水、扫弯水等对船舶航行极为不利的险滩常见流态,将险滩分为航道尺度不够的险滩与航槽内水流恶劣的险滩,其形成的原因主要有外来物侵入河床、航槽形态不良与河底有石梁等。

《川江航道整治》^[2]在险滩常见流态描述的基础上,对险滩的成因进行了分析,认为流速是泡漩水产生的动力因素,水深是必要

条件,地形是基本条件。泡漩水的形成机理是较大流速的水流产生能量转换的一种形式。一是因河岸局部凸嘴的挑流,造成急流与回流的分离,在分界面上因水流脉动与紊动作用,急流与缓流相互交错撞击,造成急流的部分动能转变为位能,使水面壅高而成为泡水;二是河底有凸起的礁石或陡壁,急流受阻后部分动能转变为位能而形成泡水。泡水的强度可用泡水的直径、高度与扩散速度等数值表示。

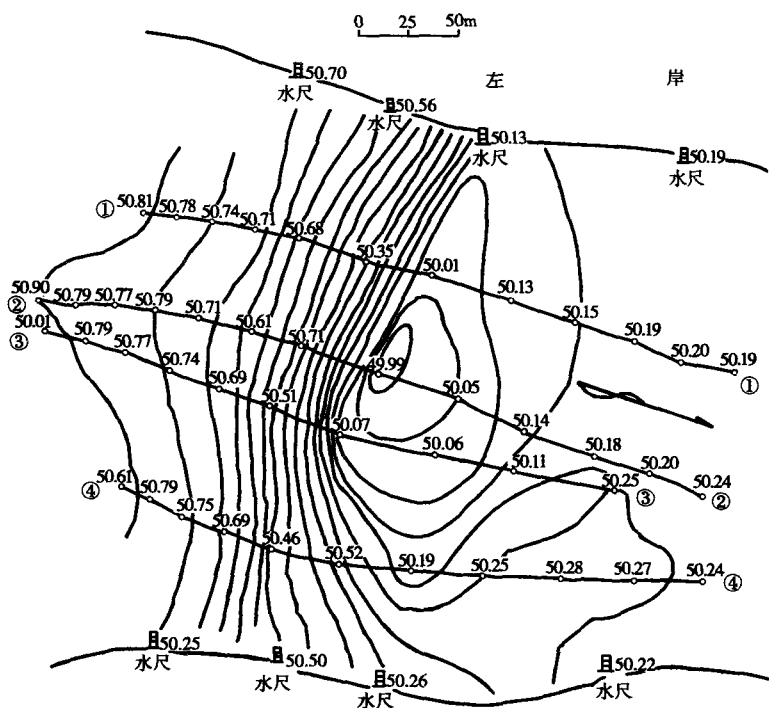


图 1.1 川江青滩实测水位等值线图(高程为吴淞系统)

滑梁水是特定的河床形态所造成的,其强度与河床断面、流速流向、涨水或退水等情况有关。扫弯水的强度主要与河道弯曲半



径有关。

李庭富^[9]利用变坡水槽研究了滑梁险滩纵向流速的沿程分布,石梁以宽顶堰概化,依据试验资料得到经验公式:

$$V = (1.427\sigma H_1^{1.5} - V_0)(e^a)^{\frac{1}{H_1}} \quad (1.1)$$

式中, V 为受宽顶堰影响而增加的流速, σ 为宽顶堰的淹没系数, H_1 为堰上水深, V_0 为堰上不受宽顶堰影响的水流速度, a 为流速 V 在堰上游沿程衰减的系数,由 $a \sim \delta/H_1$ 曲线查得。但滑梁水的产生主要是石梁与主流斜交,因而,正交的宽顶堰与垂向收缩的急流滩特性基本相似,不能完全反映出滑梁水的水力特性。

1975 年为解决葛洲坝工程南津关河段的航道内泡漩水碍航问题,长江水利水电科学研究院采用 0.35m 宽的水槽,通过改变凸嘴尺度和形态研究了泡漩水流的成因^[10,11]。

2003 年彭凯等^[12,13]进行了专题研究,对顺直河段的突嘴深沱泡漩水、深沱孤礁泡漩水和孤礁阻水泡漩水进行了水槽概化的试验研究。试验水槽尺度为 20m(长) × 1.2m(宽),依据试验资料得到泡高的经验计算公式:

$$h_0/R = kRe^{\lambda_1} J^{\lambda_2} (L/b)^{\lambda_3} \quad (1.2)$$

(1) 突嘴深沱泡漩水有: $k = 8.2015 \times 10^{-5}$, $\lambda_1 = 0.5379$, $\lambda_2 = 0.4760$, $\lambda_3 = -0.4805$;

(2) 深沱孤礁泡漩水有: $k = e^{-24.2924}$, $\lambda_1 = 1.5323$, $\lambda_2 = 0.1736$, $\lambda_3 = 0.0648$;

(3) 孤礁阻水泡漩水有: $k = e^{-12.4663}$, $\lambda_1 = 0.9593$, $\lambda_2 = 0.2687$, $\lambda_3 = 0.1840$ 。

式中, h_0 为泡高,即所测断面泡水最高水位减去平均水位的值; R 为礁石或突嘴压缩断面的水力半径; k 为系数; Re 为礁石或凸嘴压缩断面的水流雷诺数; J 为水面比降; L 为礁石或突嘴的阻水宽度; b 为河道宽度; $\lambda_i (i = 1, 2, 3)$ 为系数。

上述泡高计算式中系数相差较大,甚至同一因素在一种形式的泡漩水中与泡高成正比,在另一种形式的泡漩水中成反比。实际上不管何种原因产生的泡漩水,其运动变化应遵循同一规律,因而泡高的计算公式有待进一步完善。由此可见,山区河流的水流条件极为复杂,有待人们进一步深入探讨的问题确实很多。

1.1.1.3 汉流滩水力特性研究

平原河流的分汉河道整治研究较多,教科书上多有较为系统的成果可供参考^[14,15],但平原河流的河床可动性较大,整治工程引起周围水流相应变化,水流的变化将使得河床自动调整以适应新的水流条件。在一汉道内的整治,可能影响到另一汉道的分流、分沙量,影响程度与工程部位及工程量的大小有关。而山区河流的河床可动性较小,整治工程实施后,周围河床一般无法自行调整,整治工程引起的水流变化和汉道内河床糙率变化将非常敏感地影响另外一汉的分流。

河道分汉是山区河流中常见的一种形态,汉道内往往伴随急滩或险滩的出现,人们的目光往往注重于急、险滩的整治,但整治前后各汉流量的反馈调整使得汉流滩表现出特有的水力特性。如果只着眼于某一汉道内急、险滩的治理,可能达不到预期的整治效果,有必要研究汉流滩的水力特性。

非冲积性河流汉流滩的水力特性研究不多,文献[1,2]均未单独讨论。西南水运工程科学研究所^[16]对川江上汉流滩的汇流口和分流口的水流特征进行了分析认为,水流顶冲分流口,水流动能转化为势能,产生水位壅高;汇流口附近因两汉水流能量的剧烈交换而产生一系列泡漩水,出现低速带,洲尾两侧常有回流伴随;水流特征值(流速分布、河心水面线、横比降、流态等)的变化在工程(分流坝与洲尾坝)前后只有量的增减而无质的改变。

程昌华等^[17]对川江汉道浅滩的基本特征和成因进行了分析,认为应慎重选择通航汉道。蔡国正等^[18]研究认为:任一支汉的阻



力变化都将引起各汉的分流变化;为保证通航支汉的开挖效果,需重视因开挖引起各汉流量反馈的负效应,往往需要在副汉中进行辅助整治;在满足航深、航宽的条件下,通航支汉的开挖形式应结合进出口流态,以倒喇叭口形式拓宽为宜,而以分流为主的非通航支汉开挖以挖深为佳。对于非通航支汉何种开挖形式最佳的问题,应强等^[19]在试验中发现挖宽比挖深的分流效果更好。这可能与各滩的特性及支汉进口处的流速分布有关。

对于各汉相互影响的问题,罗肇森^[20]提出分汉河道水力计算的联解法,在没有边界流量资料时,通过边界水位及河床糙率系数计算出分流口及汇流口的水位、各汉分流量。谢盛明^[21]通过对两汉水面线计算,推求出整治后各汉分流比及分流点位置。

1.1.1.4 卵石滩水力特征研究

山区河流一般峡谷与宽谷相间,宽谷河段一般河道宽浅,河床多由沙卵石组成,就航行条件而言,汛期“阻于峡”,枯水“碍于滩”。沙卵石滩一般在洪水期形成,枯水期碍航。洪水期挟沙能力强,大量沙石随洪水从窄深河段而下,在宽谷河段因河道变宽,水流流速减缓,水流挟沙能力减小,沙卵石容易落淤;山区河流水位猛涨猛落,洪水很快消退,由洪水很快进入枯水,冲刷能力较大的中水期持续时间较短,在宽谷河段淤积的沙卵石往往不能全部冲走,在枯水期成为沙卵石滩而碍航。

沙卵石滩一般为过渡段浅滩,滩段往往有上下深槽,滩段水力特征主要表现为浅和急。如川江浅滩有 61 处,大多为卵石浅滩,主要分布在万县至宜宾河段,其中过渡段浅滩 36 处,约占总量的 60%^[22]。滩段为半冲积性河床,年内冲淤基本平衡,年际间洲滩形态与滩槽位置变化不大,河床基本稳定,川江的沙卵石滩上实测水深在 20 世纪 40 年代与 60~80 年代整治时基本一致就是很好的例证。但滩段的地形是处于动平衡状态,汛期由窄深河段冲刷下移至宽浅的浅滩河段淤积,汛后落水期冲刷下移至下一窄深河

段,以接力的方式向下运动。浅滩的真正形成是在历史上窄深河段与宽浅河段的演变过程中形成^[23],浅滩洪淤枯冲在年内达到冲淤平衡。

文献[1]将沙卵石滩按成因与主要特征分为过渡段、河弯、汉流、支流河口、峡口等浅滩。过渡段浅滩的水流特征是滩脊处枯水期流速较大,而洪水期水流因扩散使得流速较小;演变的特征为浅滩的平面形态随着上下深槽与边滩的消涨而左右摆动,滩顶高程洪高枯低。河弯浅滩的水流特征是在离心力作用下凹岸水面高,产生指向凸岸的横比降,形成螺旋状向前推进的环流;在环流作用下弯道容易发生横向变形。汉流浅滩的水流特征是汉道分流点附近水面壅高,常有横比降出现。峡口浅滩的水流特征与急流滩相似。

前苏联的洛西也夫斯基通过试验提出浅滩的局部比降与流速水头、滩顶水深和河底倒坡间关系式^[24]:

$$J = \frac{a}{Lh_0} \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (1.3)$$

式中, J 为滩段的局部比降; a 为滩段高度; L 为滩段长度; h_0 为滩顶水深; V 为滩顶断面平均流速; α 为动能修正系数。

滩段水力特性的研究与沙卵石的起动与输移有关。沙卵石一般为级配较宽的非均匀沙,非均匀沙的起动与输移近年来研究较多^[25~35],以下是部分研究成果。

文献[1]提出卵石的起动流速公式:

$$V_0 = kd^{1/3}h^{1/6} \quad (1.4)$$

式中, d 为卵石直径(m); h 为水深(m); k 为与河床光滑程度及卵石的起动情况有关的系数,光滑平底床面的单颗起动时 $k=2.8$,粗糙床面的单颗起动时 $k=5.6$,粗糙平底床面的群体中个别起动时 $k=6.5$,粗糙平底床面的列队排列破坏时 $k=7.5$,粗糙平底床面的鱼鳞状破坏时 $k=8.0$ 。

作者^[25,26]提出考虑粗细颗粒间隐暴作用的非均匀沙起动流速公式:

$$V_0 = 1.3 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g \frac{d_i^2}{d_m} \frac{\log \frac{11.1 h}{d_{84}}}{\log \frac{15.1 d_i}{d_{84}}} \eta^{-0.28}} \quad (1.5)$$

式中, d_i 为起动颗粒粒径; d_m 为床沙的平均粒径; γ_s 为泥沙重度; γ 为水的重度; η 为不均匀系数 $\eta = \sqrt{d_{75}/d_{25}}$ 。

刘兴年^[27]提出非均匀沙推移质输沙率公式:

$$\Phi = 11.2 \left(\frac{1}{\Psi} - 0.03 \right)^{4.4} \Psi^{2.9} \quad (1.6)$$

$$\Phi = \frac{q_{si}}{\gamma_s P_i} \sqrt{\zeta \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \frac{1}{g d_i^3}} \quad (1.7)$$

$$\Psi = \zeta \frac{(r_s - r) d_i}{\tau_0} \quad (1.8)$$

式中, τ_0 为床面切应力, P_i 为床沙中 i 粒径组床沙所占的比例, q_{si} 为床沙中 i 粒径组床沙的输沙率。

1.1.1.5 支流河口滩险水力特性研究

山区河流干支流交汇的汇流口河段是干支直达、河海相通的航道网和山区通江达海水运通道的重要组成部分。支流河口常常因交汇角较大造成流态紊乱、泥沙淤积,使得航行条件恶劣,形成碍航滩险。

支流河口段的水流、泥沙运动,既受上游来水来沙的影响,也受下游干流顶托的影响,影响因素复杂。目前,对入海河口的研究无论从深度还是广度上均远远超过内陆河口的研究,在现有支流河口的研究中又偏重于支流对干流的影响,以及在干流中形成的滩险整治研究,干流对支流影响的研究不多,长期以来我国支流河口航道治理的投入也较少。