



渠江丹溪口航道整治方案优化数值模拟*

杨忠超¹, 杨 雷¹, 巴 添²

(1. 重庆交通大学, 内河航道整治技术交通行业重点实验室, 重庆 400074;

2. 中铁长江交通设计集团有限公司, 重庆 401120)

摘要: 丹溪口滩险治理是渠江航道整治的关键性工程。草街电站成库后水位上升及洪水冲刷导致江心洲左支汊发展和岸坡崩塌, 严重危及右岸航槽稳定以及左岸居民财产安全。拟采取护岸、封汊、挑流和固滩的措施加以整治, 提出了 4 个整治布置方案。采用二维水流数模和极限冲深公式对各个整治布置方案开展了多级流量计算, 通过流速、流向和冲刷深度等指标进行综合比较, 优选推荐整治方案: 顺直斜坡式护岸阻止丹溪口左岸持续崩塌, 锁坝防止左汊进一步变深变宽, 江心洲头设置鱼嘴形护坝减小冲刷。研究成果可为渠江丹溪口航道整治工程设计提供科学依据。

关键词: 渠江; 航道整治; 数值模拟; 冲刷深度

中图分类号: TV 856; U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)08-0114-07

Numerical simulation for optimization of channel regulation scheme for Danxikou in the Qujiang River

YANG Zhong-chao¹, YANG Lei¹, BA Tian²

(1. Key Laboratory of Inland Waterway Regulation Engineering Ministry of Communications,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. China Railway Changjiang Transport Design Group Co. Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: Regulation of the Danxikou rapids is a key project for the regulation of the Qujiang channel. The rising water level of Caojie Hydropower Station after impoundment and flood scouring lead to the development of the left branch of the river island and the collapse of the bank slope, consequently seriously endangering the stability of the navigation channel along the right bank and the property safety of residents on the left bank. This paper proposes building a revetment, enclosing the branch, flipping, and consolidating the beach as regulation measures and puts forward four regulation layout schemes. It calculates the multi-level flow of each regulation layout scheme with a two-dimensional numerical flow model and the maximum scouring depth formula. Then, it provides an optimal recommended regulation scheme through a comprehensive comparison according to the indexes of flow velocity, flow direction, and scouring depth. Specifically, the straight slope revetment prevents the continuous collapse of the left bank of Danxikou, the closure dam prevents the left branch from further deepening and widening, and the fish mouth revetment set at the head of the river island reduces scouring. The research results can provide a scientific basis for the design of the channel regulation project for the Danxikou section of the Qujiang River.

Keywords: Qujiang River; channel regulation; numerical simulation; scouring depth

收稿日期: 2022-01-03

*基金项目: 重庆市研究生教育教学改革研究一般项目(yjg183092)

作者简介: 杨忠超(1972—), 男, 博士, 研究员, 从事航道整治、计算流体力学方面的研究。

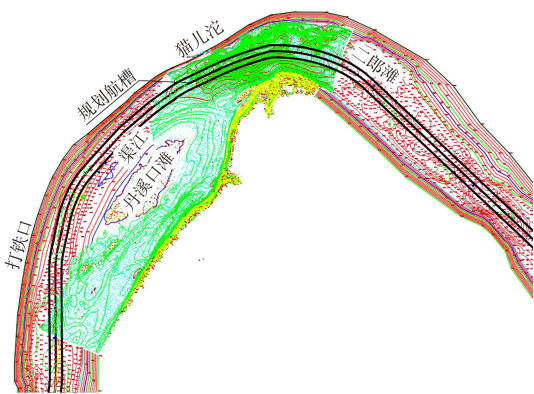
随着西部大开发和长江经济带等国家战略的推进, 川渝两地经济快速发展, 四川达州、广安地区以及重庆合川地区对渠江水上货物运输需求增长迅速, 但是渠江重庆段航道尚未进行系统性的整治, 存在碍航滩险, 已成为制约渠江流域航运发展的瓶颈, 因此推进渠江重庆段航道整治工程迫在眉睫。

数值模拟是航道整治重要的研究手段之一。杨忠超等^[1]建立了佛面滩河段二维水流数学模型, 研究了礁石不同炸深对航行条件的影响。曹晓萌^[2]采用数值模拟方法研究了淹没双丁坝和非淹没双丁坝的作用尺度及累积效应。张帅帅等^[3]建立了三峡水库外梁河段平面二维水流数学模型, 分析河段的碍航特性, 并对比不同方案的整治效果得出了最优方案。冯小香等^[4]采用三维水流数学模型模拟了三峡两坝间炸礁、抛填等航道整治措施后的流场, 为整治方案的优化提供了科学依据。张明进等^[5]将数值模拟技术应用于长江中下游航道整治, 取得很好的效果。上述研究成果表明数值模拟方法用于渠江丹溪口整治方案优化研究是有效可行的。

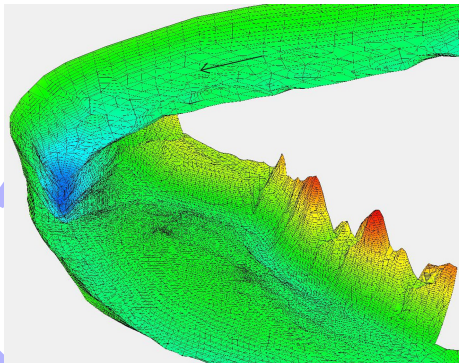
1 工程河段河床演变及碍航特性

1.1 河床演变

丹溪口滩险治理是渠江航道整治的关键性工程, 距渠江河口约 76.5 km, 位于草街电站常年库区尾端。如图 1 所示, 丹溪口河段呈 90°急弯, 弯顶上游两岸岩石坚硬, 航道狭窄, 航槽位于河心; 弯顶长期受强烈环流淘刷作用, 形成深沱; 弯顶下游右岸为基岩, 不易冲动, 为深槽区, 深泓左侧为凸岸淤积边滩区, 岸坡由冲积松软细砂构成, 库岸整体处于稳定状态。2015 年 7 月受洪水及暴雨的影响, 左侧边坡出现长约 500 m 的垮塌, 随后逐年跨塌后退形成河漫滩, 至 2018 年时, 岸坡相比 2015 年向后塌岸后移了 15~50 m, 局部达到 100 m, 同时洪水切割边滩形成左汊和江心洲, 左汊有不断刷深和变宽趋势(图 2)。

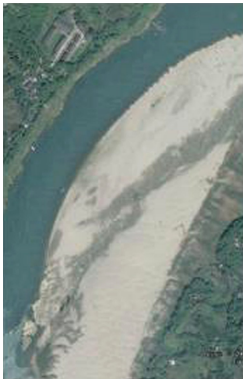


a) 平面



b) 三维地形

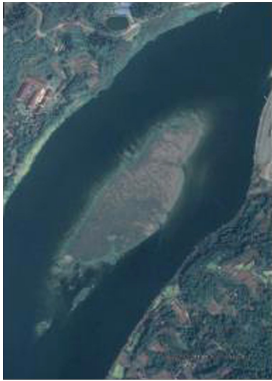
图 1 渠江丹溪口河段河势



a) 塌岸前2014年卫星照片



b) 塌岸后2015年卫星照片



c) 塌岸后2019年卫星照片

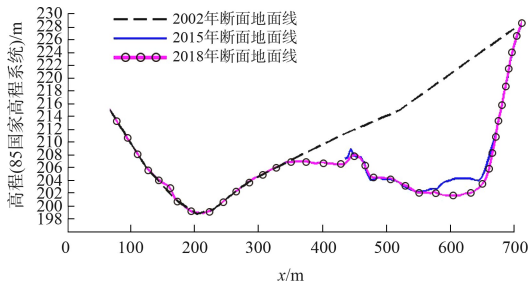


图 2 丹溪口滩险塌岸前后对比

1.2 碍航特性

由单一河道演变成分汊河道，分汊河道由于水流和泥沙分股输移，水流及边界条件复杂，各汊河势及分流分沙比发生变化，枯期分流比从 2015 年的 1:9 变化成 2018 年 2:8。右侧主航槽流速降低，导致以前形成的冲淤平衡被破坏，主航槽内出现局部泥沙淤积，对主航槽的稳定极其不利；左汊流速增大，且左汊水流流向与岸坡逐渐形成夹角，加剧了岸坡冲刷，垮塌的范围增大。根据实测地形对比发现，2015 年 6 月—2019 年 6 月，左侧岸坡沿河岸长度方向已坍塌 1.2 km，垂直河岸宽度方向最大坍塌 200 m，坍塌量达 60 万 m³，对下游浅滩淤积造成极其不利的影响。

2 数学模型的建立

2.1 基本方程的数值离散

采用浅水方程建立二维水流数学模型，离散包括时间和空间离散，时间的离散采用中心差分法，空间的离散采用控制体积法。

2.2 边界条件

边界条件有开边界和闭边界。开边界即进出口水边界，进口给定流量，出口给定相应的水位；闭边界即陆域边界，取边界法线方向流速为零；采用判定露滩点并引入动边界处理方法来解决不间断露滩问题。

2.3 研究河段网格剖分

研究的河段上、下游边界距渠河口分别为 80 和 63 km，总长 17 km。用三角形网格对该计算区域进行剖分，在护岸区单元平均长 2~5 m、其他河段长 40~50 m，共剖分节点 215 036 个、单元 41 985 个，并对丁坝和锁坝区域的网格进行局部加密，丹溪口区域局部网格见图 3。

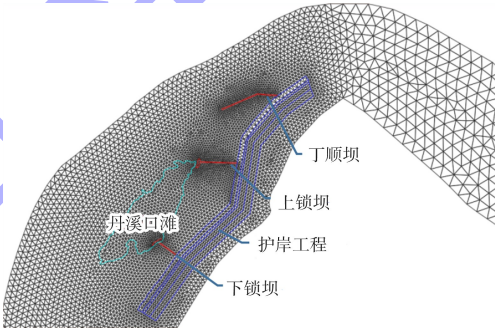


图 3 丹溪口河段整治工程计算网格剖分

2.4 模型验证

2.4.1 糙率率定

采用小河嘴(距渠河口 63.3 km)与富流滩枢纽坝下(距渠河口 87 km)水位流量关系对整治工程河段糙率进行率定，得到研究河段糙率为 0.042。

2.4.2 流速流向验证

从图 4 实测流向与计算流向比较来看，流迹吻合良好。从图 5 断面实测流速与计算流速的比较来看，断面计算流速的大小和分布以及最大值、最小值的位置均与实测资料较为一致，各测点流速的计算值与实测值之间的差值绝对值大多在 0.15 m/s 内，个别差值较大的绝对值也在 0.25 m/s 以内，相对误差基本控制在 10% 以内，满足《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》。

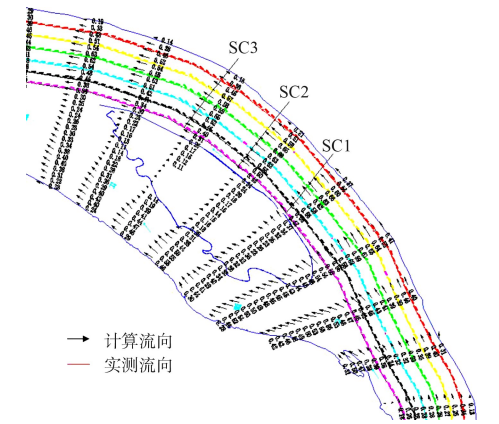


图 4 $Q=854\text{ m}^3/\text{s}$, $H=203.98\text{ m}$ 流向验证

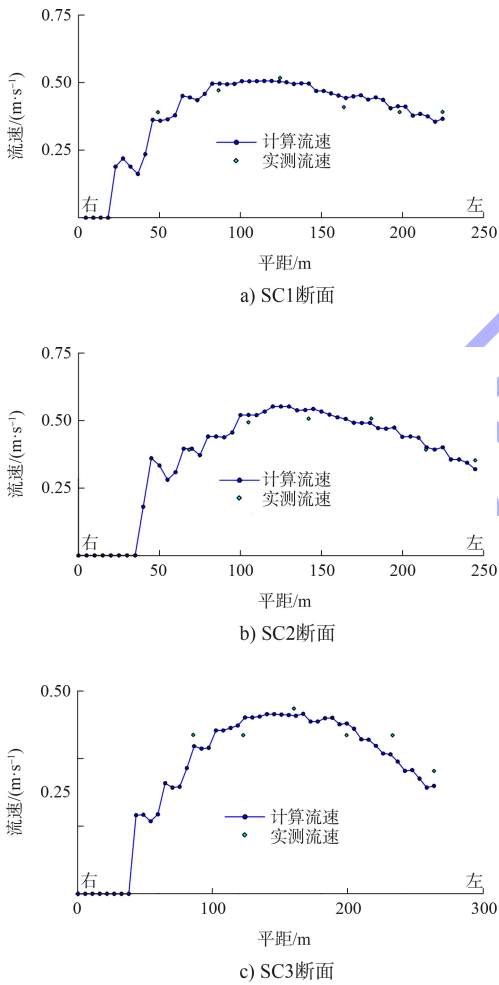


图 5 $Q=854\text{ m}^3/\text{s}$, $H=203.98\text{ m}$ 流速验证

3 丹溪口整治方案优化

3.1 整治标准及原测

根据《重庆市发展和改革委员会关于渠江重庆段航道整治工程可行性研究报告的批复》，渠江通航标准如下：1) 航道等级为Ⅲ级；2) 丹溪口—渠

河嘴航道尺度为 $60\text{ m}\times2.8\text{ m}\times480\text{ m}$ (航宽×航深×弯曲半径)；3) 保证率 95%。

整治原则：根据渠江航道的实际情况，辅以少量整治建筑物，束水攻沙，保持航槽的稳定，保持边滩堤岸的稳定。

3.2 整治建筑物布置

如图 6 所示，针对丹溪口左岸崩塌问题，结合目前冲垮后的河岸线，采用顺直斜坡式护岸结构阻止丹溪口左岸持续崩塌。护岸总长 1 175 m，分为 5 段，从上游至下游长度依次为 149.8、187.5、272.1、302.3、263.3 m。坡脚高程为 203.0 m，坡顶高程为 220.0 m，护岸坡坡为 1:3，在高程 211.0 m 处设置 1 道 2 m 宽马道，护岸后方回填至 220.0 m。同时为了调整水流方向、减少枯水期河水冲刷滩面和堤脚，在距护岸起点 143 m 处设置 1 道 3 m 宽丁顺坝，在距护岸起点 455 和 932 m 处，分别设置两道 3 m 宽锁坝，封闭左汊上、下端并阻止汊道进一步加深加宽，坝顶高程均为 203.0 m。

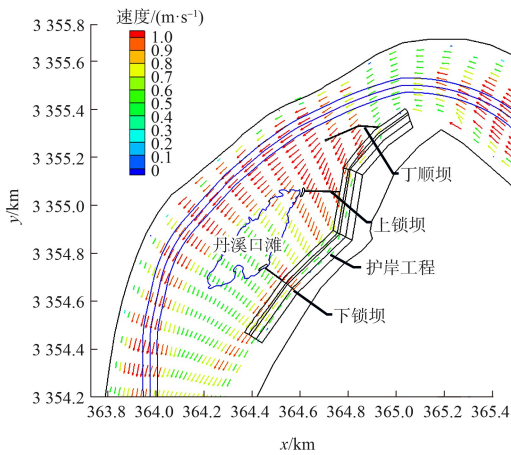


图 6 $Q=3\,000\text{ m}^3/\text{s}$, $H=205.18\text{ m}$ 丹溪口河段计算流场

3.3 布置方案

从图 6 可见，丹溪口丁顺坝位于狭口出弯左岸。如果丁坝与护岸夹角过大，则束窄河道，挑流作用加强，可能会增大右岸岸边流速，冲刷右岸；如果夹角过小，则顺坝水流增大江心洲面流速，冲刷洲面，造成心洲不稳，危及航槽稳定。为此拟定不同夹角方案，见图 7 和表 1。

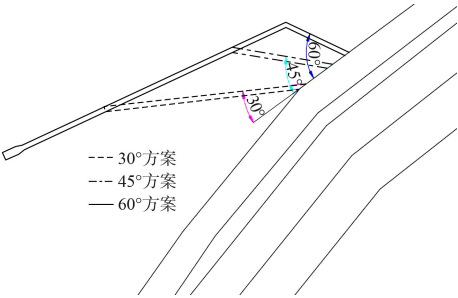


图 7 丁顺坝布置方案

表 1 整治布置方案

方案	布置情况
整治前	天然情况,无整治方案
1	封汊,无丁顺坝
2	封汊+丁顺坝,丁坝与护岸夹角 30°
3	封汊+丁顺坝,丁坝与护岸夹角 45°
4	封汊+丁顺坝,丁坝与护岸夹角 60°

3.4 评价指标

选择反映水流特性的流速、流向和反映江心洲冲刷程度的极限冲深等 3 个指标评判方案的优劣。极限冲深采用 GB 50286—2013《堤防工程设计规范》D. 2. 2-1 计算公式：

$$h_s = H_0 \left[\left(\frac{U_{cp}}{U_c} \right)^n - 1 \right] \tag{1}$$

$$U_{cp} = U \cdot \frac{2\eta}{1+\eta} \tag{2}$$

$$U_c = \left(\frac{H_0}{d_{50}} \right)^{0.14} \sqrt{17.6 \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d_{50} + 6.05 \times 10^{-7} \frac{10 + H_0}{d_{50}^{0.72}}} \tag{3}$$

式中： h_s 为冲刷深度，简称冲深(m)； H_0 为冲刷处的水深(m)； U_{cp} 为近岸垂直平均流速(m/s)； U_c 为行进流速(m/s)，根据数模计算成果取值； n 与防护岸坡在平面上的形状有关(1/4~1/6)，取 $n=0.22$ ； η 为水流流速不均匀系数，根据水流流向与岸坡交角 α ，查表 D. 2. 2 采用，即 $\alpha=0$ 时 $\eta=1.00$ ， $\alpha=30^\circ$ 时 $\eta=1.50$ ， $\alpha=90^\circ$ 时 $\eta=3.00$ ； d_{50} 为床沙的中值粒径(m)，根据地勘报告，江心洲床面为细沙，粒径为 0.075~0.250 mm，基于最不利考虑，本次计算取 0.075 mm； ρ_s 为泥沙密度，取 1.95 t/m³； ρ 为水密度，取 1 t/m³。

3.5 水流和冲刷特性分析

从图 6 计算流场分布来看，弯顶上游，主流

位于河心，弯顶深沱区流速较小；弯顶下游，江面展宽，水深变浅，水流散开，右岸深槽为主流区，江心洲分流，部分水体进入左汊。

图 8 给出了 4 个典型断面多级流量的冲刷深度。发生冲刷的流量大于 12 000 m³/s，冲深随流量增大而增加，结合图 9 可见，冲刷主要发生在右岸主槽及江心洲中前部。在流量 $Q=22\,476\text{ m}^3/\text{s}$ 时，弯顶下游最大冲深约 1.8 m，拟建丁顺坝上端至江心洲头区域冲刷约 1.0~1.5 m，洲头部冲刷约 0.5~1.0 m，江心洲中部到洲尾冲刷约 0~0.5 m。

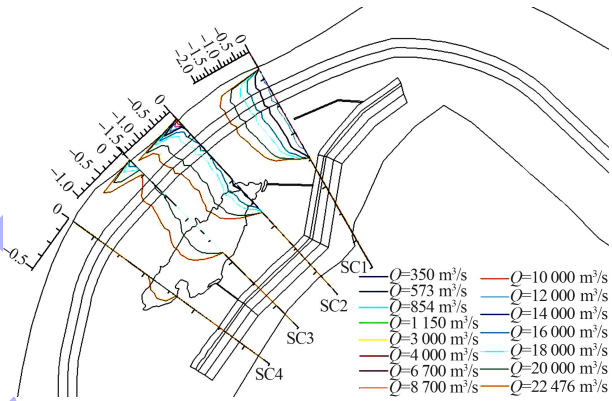


图 8 不同流量典型断面冲深分布（冲深：m）

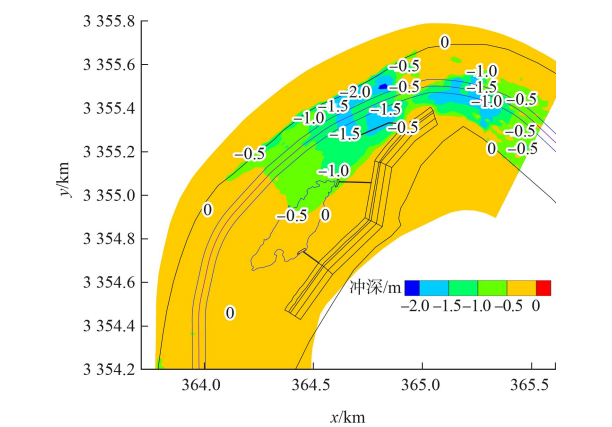


图 9 $Q=22\,476\text{ m}^3/\text{s}$ ， $H=218.56\text{ m}$ 时丹溪口整治前冲深分布

3.6 整治效果对比分析

3.6.1 流场分析

从图 10、11 可见，在小流量 $Q=1\,150\text{ m}^3/\text{s}$ 时，受锁坝和丁顺坝阻流，右汊流速略有增大，约 0.20~0.25 m/s；左岸堤脚线附近流速减小，约 0.30~0.35 m/s；江心洲面流速略有增大，约 0.1~0.2 m/s，流向向右偏转，可减小左岸冲刷。方案 1 由于无丁顺坝挑流，SC1 断面堤脚处流速仍然

较大, 洲面流速增加较其他方案略大。总体来看, 丁顺坝不同夹角方案对流速分布影响基本相当, 相对而言方案 4(60°方案)的挑流作用更强, 右槽流速增加最大。

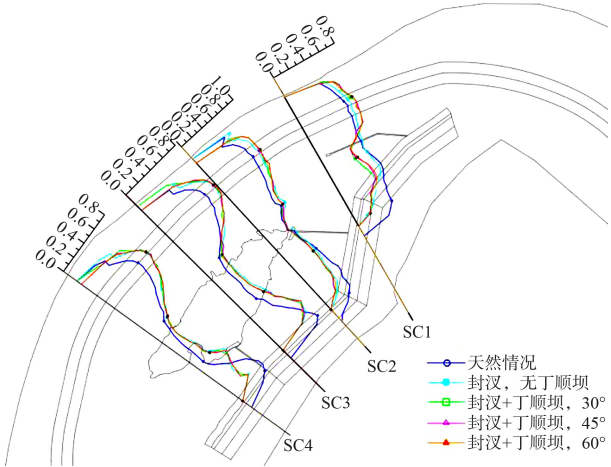


图 10 不同整治方案 $Q=1150\text{ m}^3/\text{s}$ 典型断面
流速分布 (流速: m/s)

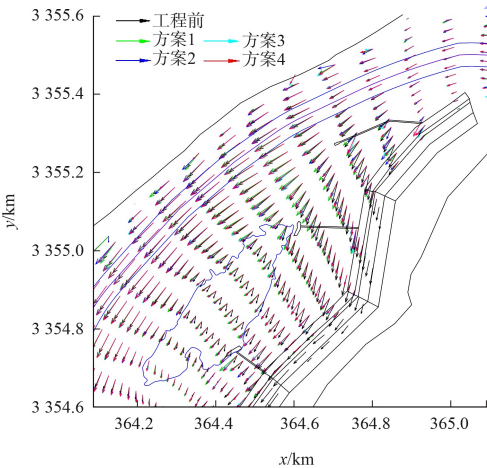
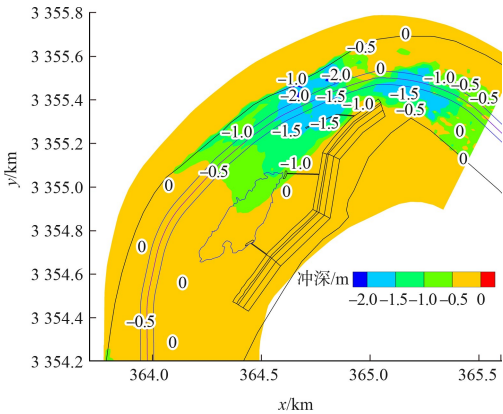


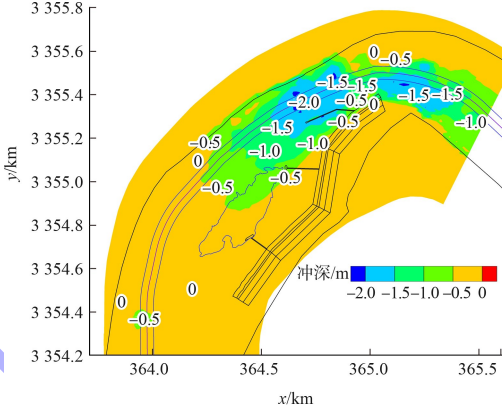
图 11 $Q=1150\text{ m}^3/\text{s}$ 时各整治方案
流场比较 (流速: m/s)

3.6.2 冲刷影响分析

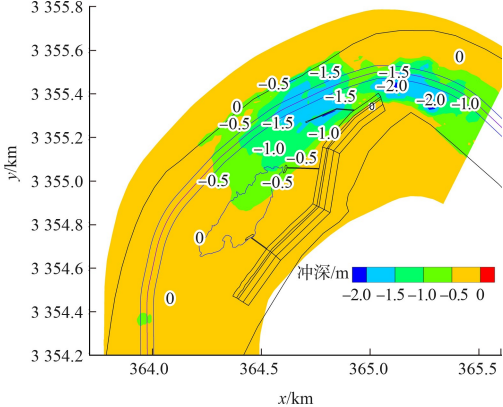
图 12 分别是各整治方案冲深分布, 可见各整治方案冲刷部位、范围基本相当, 无丁顺坝的方案 1 与其余方案的区别在于, 方案 2~4 在坝根处存在局部冲刷。从图 13 典型断面各方案冲深比较来看, 各整治方案由于减小了过水面积, 冲深较天然情况增加, 各个方案的冲深相差不大, 相对而言方案 1 冲深最小、方案 4 江心洲中上部冲深最大、方案 2 江心洲尾部冲深较大。



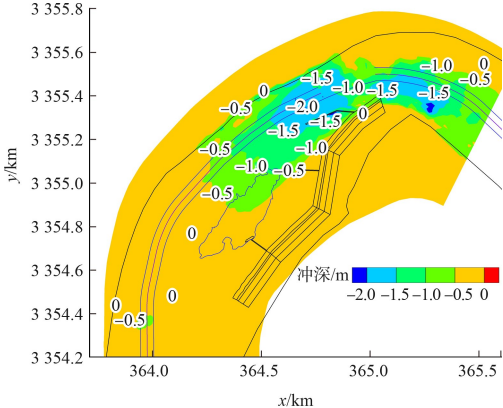
a) 方案1



b) 方案2



c) 方案3



d) 方案4

图 12 丹溪口河段各整治方案 $Q=22476\text{ m}^3/\text{s}$ 时冲深分布

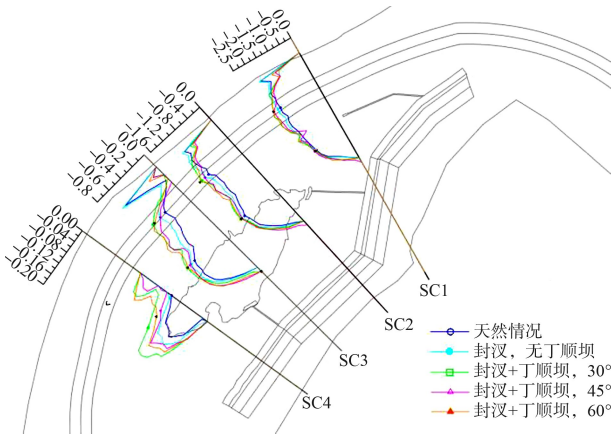


图 13 不同整治方案实施后 $Q=22\,476\text{ m}^3/\text{s}$ 典型断面冲深分布 (冲深: m)

3.6.3 整治效果

对丁顺坝 4 种布置方案进行多级流量模拟, 由于丁顺坝阻水作用, 在丁坝的右汊流速增大、左汊流速减小, 在小流量时趋势更加明显。各级流量下总体流速增加不大, 约 $0.20\sim0.25\text{ m/s}$ 。各方案比较来看, 方案 1 由于无丁顺坝阻流, 增速最小; 方案 4 挑流作用明显, 增速最大。从流场来看, 右岸岸边的流速大小与流向变化不大, 故整治实施后, 不会造成右岸的冲刷。流速及流向影响较大的区域局限于丁顺坝附近及其下游的江心洲区域, 江心洲头部、中部冲刷较整治前有所加剧, 最大增加约 $0.3\sim1.0\text{ m}$, 相对方案 1 影响冲深最小, 其余各布置方案对冲深的影响基本相当。故推荐方案 1, 即封汊、不设丁顺坝。为避免江心洲冲刷危及航槽稳定, 建议采取工程措施加强防护。

4 江心洲防护方案

针对江心洲洲头冲刷严重的问题, 提出图 14 防护方案: 在江心洲首部设置鱼嘴形护坝, 坝顶高程 203 m 、坝顶宽 2 m , 迎水坡 $1:2$ 、背水坡 $1:1.5$, 坝面浇筑 0.5 m 的 C20 混凝土, 采用钢丝石笼护脚, 质量超过 130 kg 。

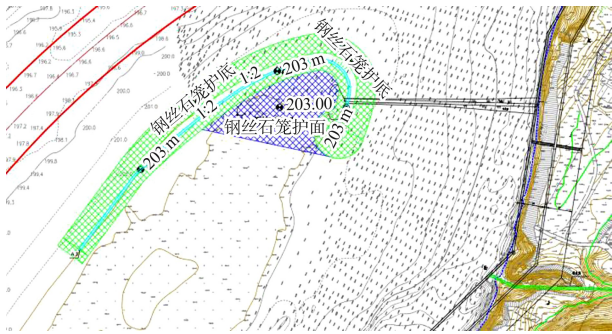


图 14 江心洲防护措施布置

图 15 是江心洲实施防护措施后的流场, 从图 15 可见, 在 10 a 一遇流量时, 江心洲防护区的流速在 $2.0\sim2.5\text{ m/s}$ 。按式 (4) (5) 块石不冲粒径计算公式得到单个粒径为 0.33 m 、质量为 43 kg 。本工程采用钢丝石笼护脚, 质量超过 130 kg , 满足防冲要求。

$$d=0.04v_f^2 \tag{4}$$

式中: d 为块石等容粒径 (m); v_f 为建筑物处的最大表面流速 (m/s)。

块石质量公式为:

$$W=\frac{4}{3}\pi r^3\rho_b \tag{5}$$

式中: W 为单个块体的稳定质量 (kg); r 为块石的半径 (m); ρ_b 为块石的密度 (kg/m^3), 取 $\rho_b=2\,250\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

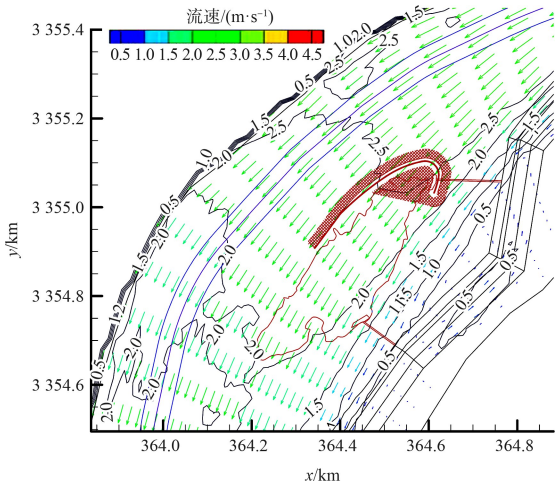


图 15 $Q=22\,476\text{ m}^3/\text{s}$ 时江心洲防护措施实施后的流场