

通州沙滩面串沟封堵高程数学模型研究*



万远扬^{1,2}, 吴华林¹, 沈 淇¹, 顾峰峰¹

(1. 上海河口海岸科学研究中心, 上海 201201; 2. 联合国教科文组织—水教育学院, 代尔夫特 2601DA)

摘要: 通州沙与狼山沙之间存在的串沟与通州沙东水道下段浅区存在一定的关联关系, 串沟的存在不仅不利于滩体的守护, 也会对主流起到一定分散或冲散作用。因此在长江南京以下12.5 m深水航道建设工程一期工程通州沙段航道整治中, 在考虑增强浅区水流动力的同时, 必须考虑限制串沟的过流来巩固护滩效果。采用二维潮流数学模型对现状滩面串沟分流能力进行分析, 通过多方案比选, 综合考虑护滩效果、限流导流作用以及投资效率, 提出可兼顾固滩稳槽与导流加深双重作用的滩面串沟整治思路, 本研究为其它类似滩面串沟封堵及分流河段的整治工程方案探讨提供了参考。

关键词: 通州沙; 串沟; 数学模型; 高滩面; 航道整治

中图分类号: TV142.3; TV 148

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)08-0008-09

Study on the tidalfat currents and navigational channel regulation of the Tongzhou shoal

WAN Yuan-yang^{1,2}, WU Hua-lin¹, SHEN Qi¹, GU Feng-feng¹

(1. Estuarine and Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China;

2. UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft 2601 DA, the Netherlands)

Abstract: The existence of the ditch between the Tongzhou shoal and the Langshan shoal should have some influence on the formation of the shallow area of the east Tongzhou shoal watercourse. The ditch not only makes against to the protection of the nearby shoals, but also plays a significant role of dispersing or breaking up the mainstream. So, as to the navigational channel regulation project of the Tongzhou shoal, both restricting the ditch, protection the shoal and improving the hydrodynamics of the shallow area should be taken account in at the same time. Based on a well calibrated 2D hydrodynamic model, the currents distribution on the shoals, ditch, tidalfat and the watercourses are analyzed, and a suitable position for restricting the ditch currents and regulating the channel is proposed. The proposed layout is certified being of dual role of both stabilizing river regime of this reach and improving the scour capability of the shallow area through scenario study.

Key words: Tongzhou shoal; erosion ditch; numerical simulation; tidalfat; navigational channel regulation

为充分发挥长江口12.5 m深水航道治理工程的综合效益, 适应沿江生产力发展的需求, 促进江苏沿江产业结构调整和提高港口综合服务能力, 加快上海国际航运中心建设, 深化长江三角洲及长江中下游地区改革开放, 促进区域协调发展产业升级, 尽快实现长江下游航道与长江口12.5 m深水航道相衔接, 我国站在战略高处

决策, 决定实施长江南京以下12.5 m深水航道建设工程^[1]。

长江南京以下有多个碍航浅滩使得12.5 m航槽不稳或间断, 其中通州沙是该区段的重点碍航河段之一(图1)。通州沙河段航道治理的核心问题是通州沙串沟及其附近滩面水流的整治: 通州沙与狼山沙间存在的这个串沟与通州沙东水道航

收稿日期: 2012-12-04

*基金项目: 交通运输部科技项目(2012-329-A06-040); 上海市自然科学基金(11ZR1415800)

作者简介: 万远扬(1981—), 男, 助理研究员, 主要从事河口水沙动力过程研究。

道浅段间存在着一定的关联性能价格比,其频繁的滩槽水沙交换不仅会分散主流,而且也会加强整个通州沙上段的泥沙交换,不利于通州沙沙体及通州沙东水道深槽的长期稳定。在前期的研究中发现:如果对该段串沟封堵高程不够,通州东

水道航道浅段动力增加会不足,影响预期的航道整治效果;但若封堵的高程过高,不仅会导致工程量的大幅增加,而且会使得整个通州沙河段阻力增加过大,减少落潮量,此外也会额外增加通州沙滩面流速,对通州沙洲滩的稳定及周边河势不利。

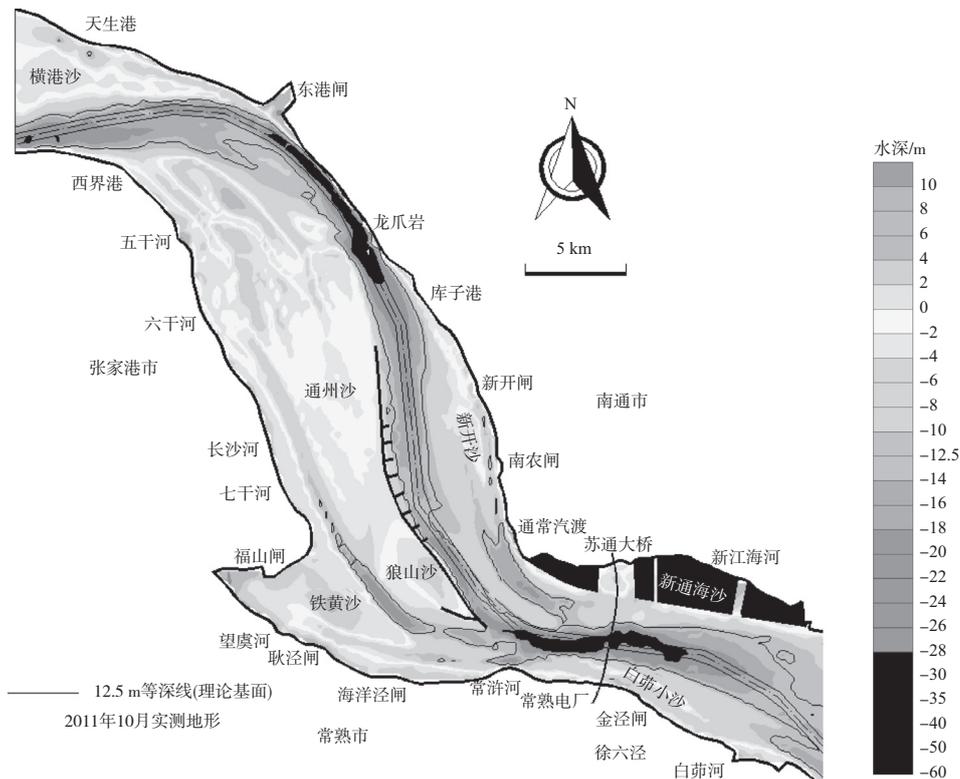


图1 通州沙河段河势

考虑到通州沙河段的复杂水沙动力条件及通州沙滩面复杂的分流情况,为确保工程取得应有的整治效果,尽量减少工程对周边河势造成的不利影响,需对长江南京以下12.5 m深水航道一期工程通州沙串沟封堵高程进行深入研究。本文将通过数学模型,来探讨通州沙串沟封堵的主要思路,并提出最优的通州沙串沟封堵平面布置方案。

1 数学模型

本次研究采用上海河口海岸科学研究中心自主开发的“长江口航道维护管理核心计算平台系统<SWEM2D/3D>”^[2]中的平面二维潮流模块进行数值模拟计算。该模型具有以下基本特点:1)应用无结构化混合计算网格(三角形+四边形),使计算域能更好模拟长江口复杂的岸线。整体模

型上游边界可以直接延伸到长江口的枯季潮区界(潮差为零的地方)大通。2)采用有限体积法作为离散格式的基础,比有限差分法更贴近物理量守恒定律,使计算的总体精度能够得到有效保证。3)采用半隐半显格式^[3-4],计算稳定性好。同时克服ADI计算格式中不能考虑不同方向流动之间相互作用的不足,且采用变时间步长计算,计算效率有所提高。4)计算基于Linux系统,较Windows系统而言,能较好地兼顾模型的计算精度(最小网格尺度)和计算效率。

本次数值计算网格如图2所示,计算范围西起上游的大通,东至外海-40 m等深线,北边界接近渤海湾,南边界包括杭州湾整个区域,其中东西向的长度约600 km,南北向的宽度约600 km。采用无结构化计算网格覆盖整个计算域,且计算网

格完全贴合工程建筑物的形状及走向，并且对通州沙河段进行局部加密，最小网格间距约为10 m，网格单元总数为62 081个。

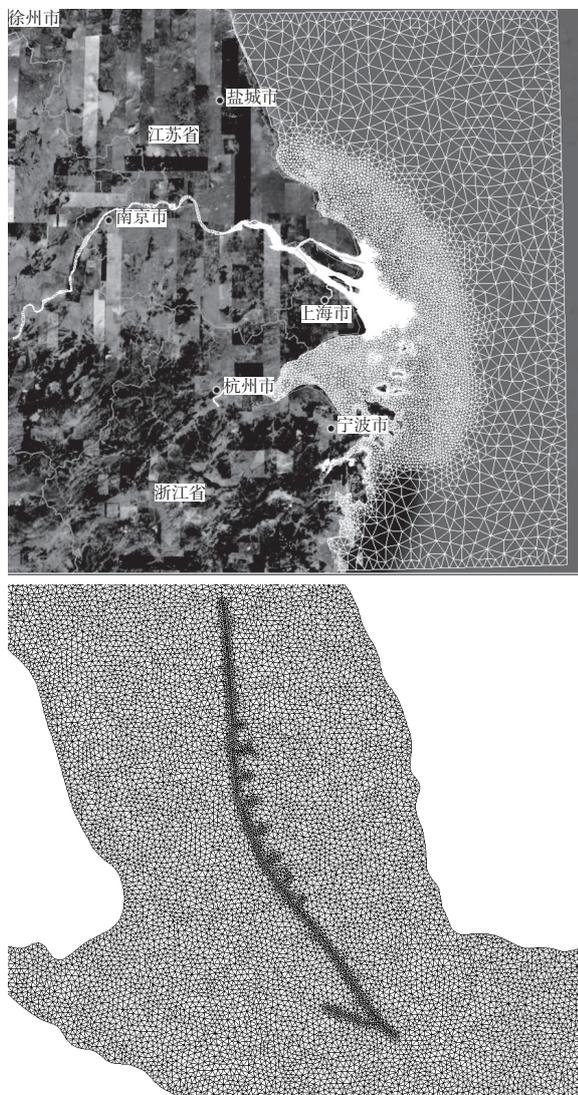


图2 SWEM模型计算网格

上游进口给定实测大通流量；模型下游边界由16个分潮的天文潮波调和常数和余水位来给定。

本次研究模型的率定与验证工作分布对照了多个年份潮位、流速流向、分流比的实测值和计算值，验证结果较好，本模型能反映出该河段的潮流特征，且精度满足工程和规范要求。限于篇幅要求具体内容见文献[5]。

2 计算结果

根据前期研究基础^[1,5]和前述率定验证好的模

型参数，通过数学模型，先分析通州沙滩面流和串沟分流现状，然后在此基础上从护滩效果和限流导流作用两个方面探讨不同串沟封堵方案的航道治理效果，分析通州沙滩面串沟治理的主要思路，提出最优的通州沙顺堤布置方案。

2.1 通州沙滩面流现状

通州沙河段，自天生港到徐六泾，虽然涨落潮主流均走通州沙东水道，但由于通州沙绝大部分滩面高程均在低水位以下，通州沙近30 km长的沙体被水流冲散，槽滩交织，水流多次分叉和汇流，滩面流情况十分复杂。为弄清楚滩面分流的情况，以本次整体流场和滩面流速及分流比都验证较好的潮流数学模型为主要工具，详细分析了洪季大潮条件下，整个通州沙东西水道及滩面的涨落潮分流情况。

落潮情况时滩面分流见图3。由图3可见：通州沙东水道主流在东港闸和龙爪岩之间，有17%的落潮潮量偏离主槽进入通州沙上段滩面；而在龙爪岩与库子港之间，这部分偏离的滩面流有约一半逐渐回归东水道，另外的部分汇入西水道主流；在龙爪岩以下，通州沙东水道逐渐由窄深向宽浅、乃至到新开闸附近时向W型河槽发育，东水道主流在南农闸附近时受地形及水流惯性的影响，有6%左右的落潮水流通过通州沙与狼山沙间的串沟，汇流进去加强了西水道下段的落潮动力；自此向下，通州沙东西水道落潮主流在狼山沙尾部并流进入徐六泾。

涨潮情况时滩面分流示意图见图4。由图4可见：涨潮情况时，由于水位较高，涨潮主流自徐六泾节点后向通州沙东西水道大约6:4分流；狼山沙滩面流在其沙体头部有50%进入东水道，但同时，东水道涨潮主流也有10%通过串沟进入西水道滩面；在裤子港、新开闸附近时，东西水道涨潮量基本相当；由于西水道上段地形的作用，西水道涨潮主流在长沙河到五干河区间，逐渐由西侧东偏汇入东水道；在东港闸附近时，涨潮流在通州沙东西水道的分配比例大约是8:2。

总体上，通州沙东西水道的落潮分流比从上游的9:1，到下游的8:2，主要分流点在龙爪岩附近的

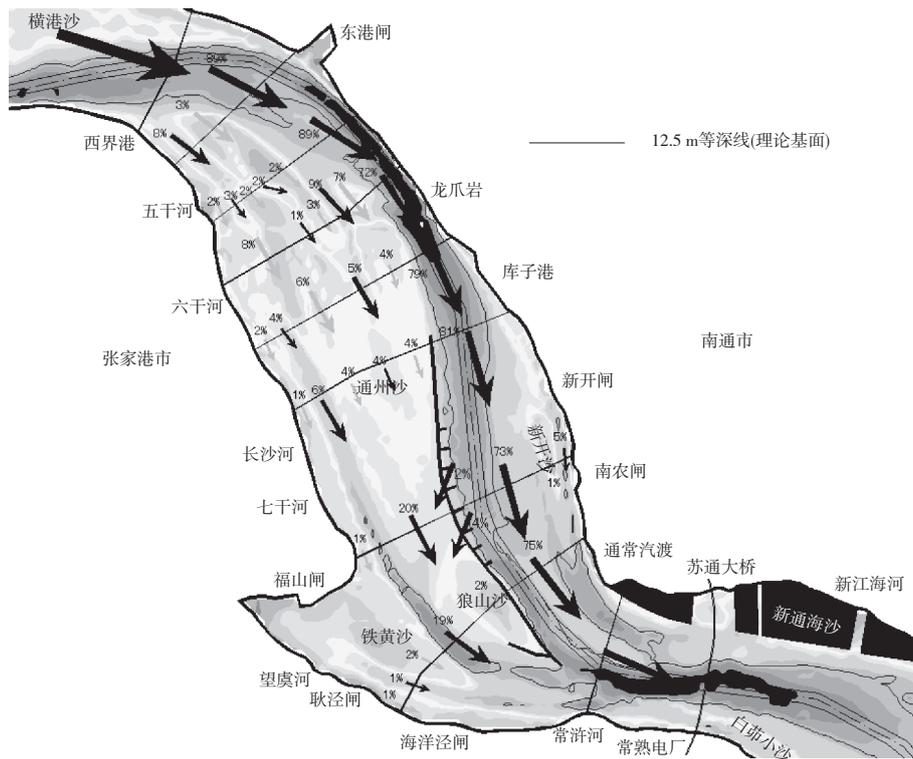


图3 洪季大潮落潮期通州沙滩面分流情况

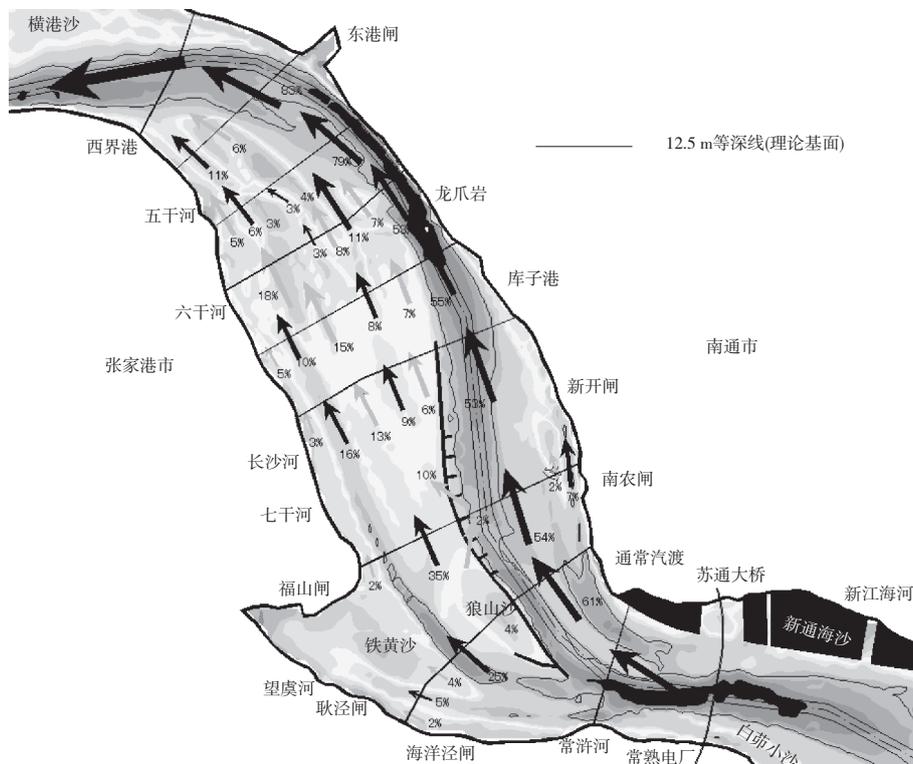


图4 洪季大潮涨潮期通州沙滩面分流情况

浅滩和通州沙串沟处; 涨潮分流比例从下游的6:4到上游的8:2, 主要汇流点在龙爪岩附近的浅滩。

对于“长江南京以下12.5 m深水航道一期工程”拟建工程布置位置, 通州沙串沟段的水沙交

换和滩面流较上段(龙爪岩附近)要弱很多, 但仍不可忽视, 因为频繁的滩槽水沙交换不仅会分散主流, 而且也会加强泥沙交换, 不利于通州沙沙体的持续发育和深槽的稳定。

根据多年地形演变分析表明，通州沙与狼山沙之间存在的这个串沟与通州沙东水道下段浅区总是相伴而生；此外串沟的存在不仅不利于滩体的守护，也会对主流起到一定冲散作用。因此通州沙串沟段（过渡段）护滩潜堤，在考虑护滩效果的同时，必须考虑限制串沟的过流来巩固护滩效果，同时也要起到导流和适当兼顾增强浅区动力的作用，这是过渡段护滩潜堤在功能定位上与其它潜堤的细微差异。

2.2 串沟分流能力

为了解本底情况下串沟的分流能力，现利用数学模型来分析洪季大潮水文条件下，串沟处涨落潮量占通州沙东水道的比值，以及串沟处涨落潮进出航道潮量的大小。经计算分析：

1) 串沟处（TZSZ2，位置见图5）分流能力：落潮时，占AD2L落潮量的4.8%，涨潮时，占16.5%。（此水文条件下，落潮时通州沙东水道分流比为80%，涨潮时为60%）。

2) 串沟处为落潮优势，优势流为66%。

3) 本底情况下，串沟处进出东水道潮量较为复杂，在涨落潮不同时期，均有进和出航道的潮量（见图6，图中1，3表示落潮进出东水道潮量方向，2，4表示涨潮进出东水道潮量方向）。串沟处涨落潮进出航道潮量1，2，3，4占总越堤流比例依次为：53.50%，27.53%，12.25%，6.71%，以图6中“1”（即落潮时由东水道出去进入西水道为主要串沟分流）所示为串沟处主要越堤流。

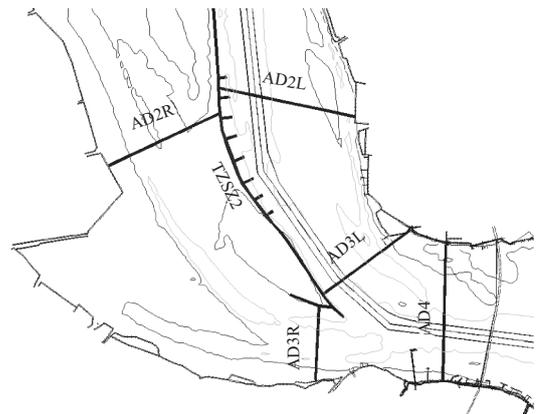


图5 潮量断面位置



图6 串沟处涨落潮越堤潮量方向

4) 本底情况下，沿通州沙整治工程顺堤布置测点，测点间距为50 m，统计在两涨两落内，穿越拟建堤轴线位置向东和向西的总潮量如图7。由图可见，总的越堤潮量的方向是从东水道进入西水道，T1~T8分别为8道齿坝的位置，主要位置在T3~T8；从西水道进入东水道的潮量主要走T4以上堤轴线位置，通过潮量为从东水道进入西水道潮量的66%。

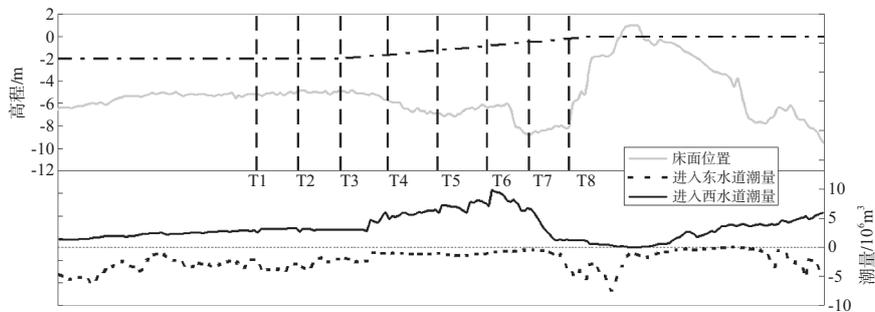


图7 两涨两落内穿越拟建堤轴线位置向东和向西的总潮量

2.3 串沟封堵高程比选

由上述分析可知，从归顺串沟处水流和守护通州沙滩体的角度出发，过渡段主要需加强封堵

的位置大致在T3~T8之间，但具体封堵高程和位置有待多方案比选来提出。

为充分论证串沟封堵高度、护滩效果、串沟

分流效果、浅区动力增加之间的联系, 在前期研究的基础上, 现设计了如下一组仅有顺堤无齿坝

的数值试验(图8)来深入探讨通州沙护滩堤串沟段高程优化的问题。

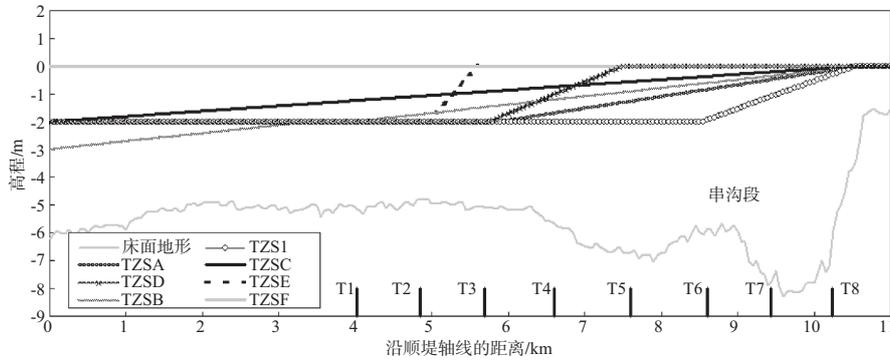
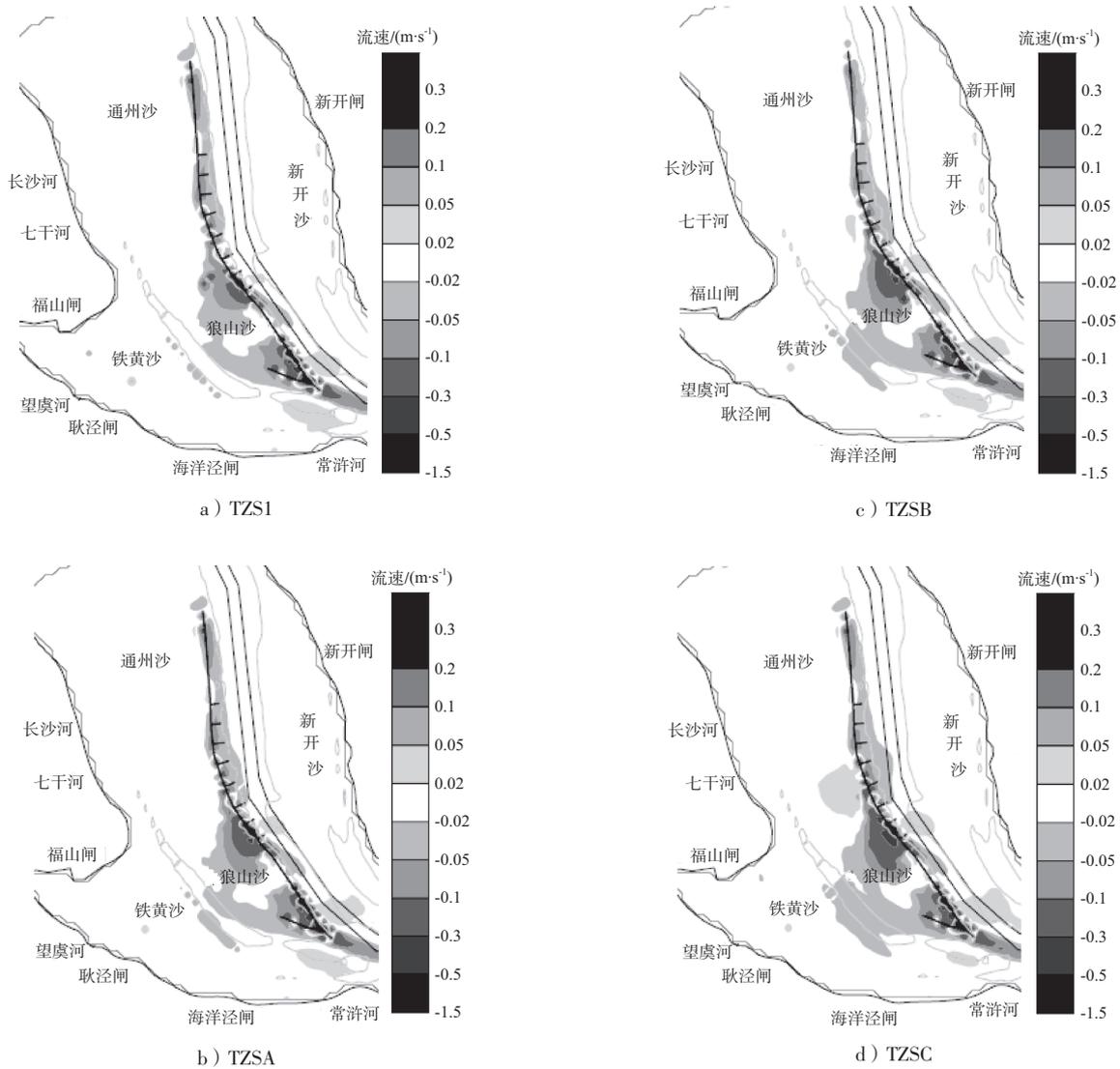


图8 通州沙过渡段高程比选设计方案沿堤高程

洪季大潮水文条件下, 各方案与本底的涨落急流速差值见图9~10。结果的分析分别从护滩效果、限流导流作用等方面出发。

2.3.1 护滩效果

从图8落急流速差值对比来看, 串沟过渡段封堵长度和高程增加后, 对沿潜堤处的落急流



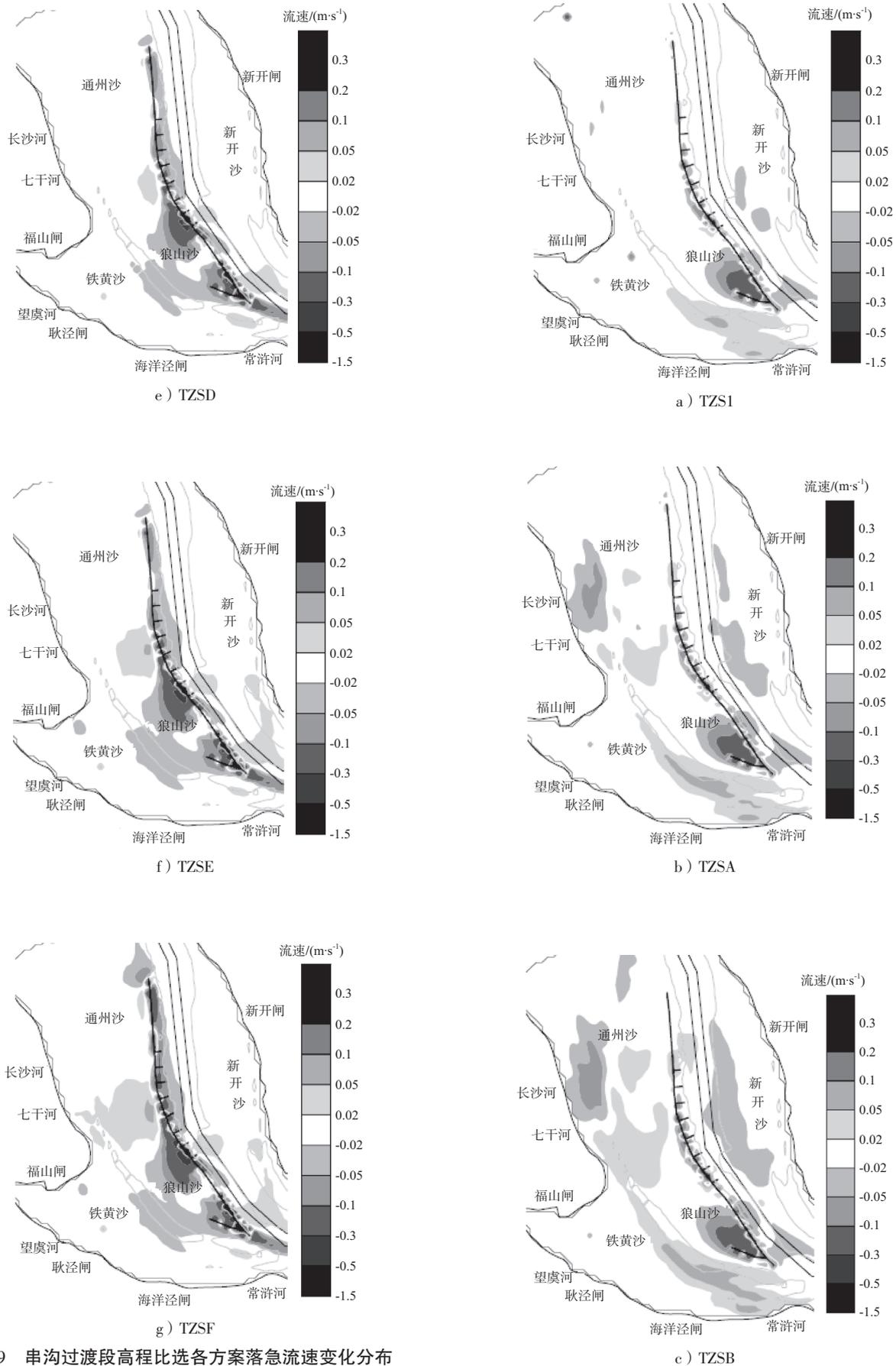


图9 串沟过渡段高程比选各方案落急流速变化分布

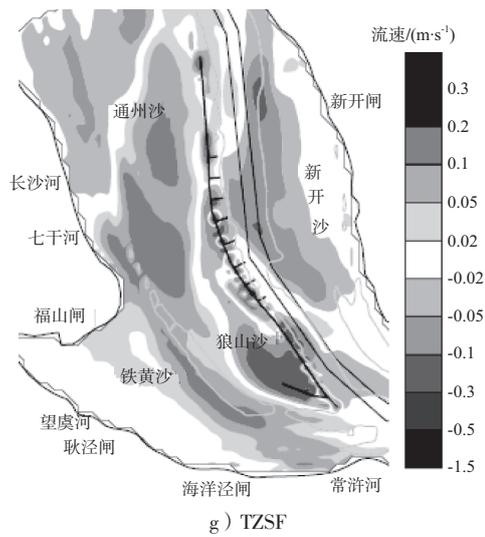
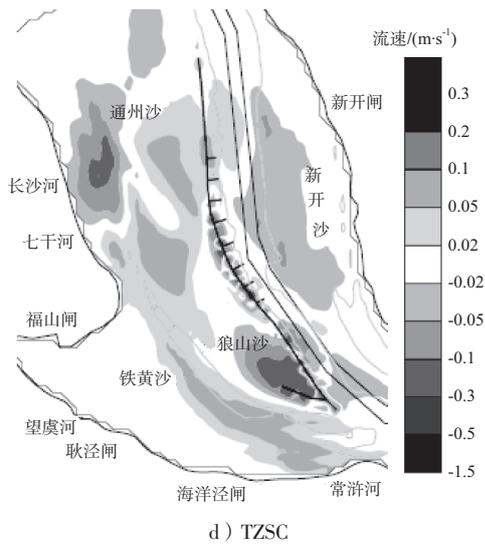
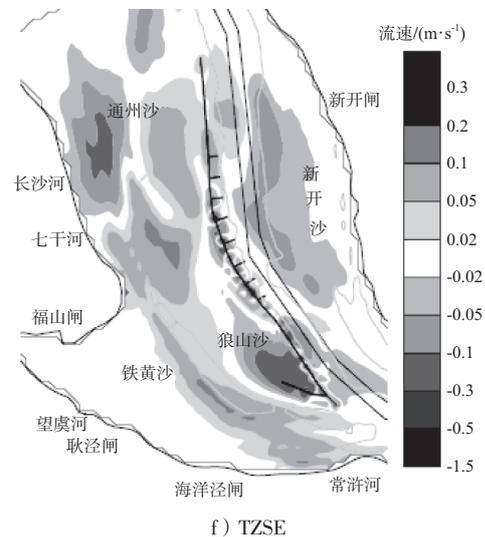
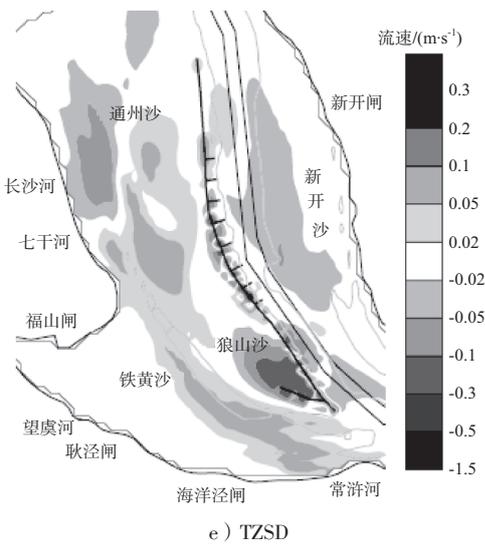


图10 串沟过渡段高程比选各方案涨急流速变化分布



速降幅逐渐增大。可见，封堵量越大护滩效果越优；同时，当封堵量增加后，对护滩潜堤右侧滩面落急流速的增幅以及增加的范围也逐渐加大，TZS1~TZSB方案右侧滩面基本不增加，但从TZSC~TZSF，右侧滩面落急流速均增大，最大增加约7 cm/s。

从图9涨急流速差值图对比来看，串沟段封堵强度增加后，通州沙东水道涨急流速明显减弱，而西水道及其左侧滩面涨急则增强。

2.3.2 限流导流作用

为深入比较不同方案的效果，现统计不同方案封堵面积、限流能力、导流能力及总阻力见表1。总体来看，随着封堵面积的增加，限流能力、落潮导流效果增强，落潮河段总阻力逐渐减弱；而通州沙东水道涨潮阻力增加、导流效果降低；涨潮河段总阻力改变不大。1) 封堵面积是指如图8中，相比无工程，平均中潮位(2 m)以下，整个通州沙护滩顺堤过水面积减少的比例；2) 限流能力是指工程前后穿越顺堤潮量的差占工程前潮量的百分比；3) 导流效果是统计的图5中AD3L(通州沙东水道)工程前后潮量差异；4) 总阻力是统计的图5中AD4(徐六泾)工程前后潮量差异(由于徐六泾具有作为附近河段控制节点作用，其断面的潮量增减可表示本河段阻力的增减)。

为进一步遴选方案，3个主要统计指标与

TZS1对比的差值见表2，对于同样封堵面积的增幅，TZSB方案限流能力和导流效果的增加幅度最大，从投资效率来看，TZSB方案最优。

此外，从功能定位出发，通州沙护滩潜堤的限流能力和导流效果越好，也会间接巩固滩体守护效果。

表1 不同方案限流导流能力对比

统计指标	封堵面积	限流能力 (由东向西)	限流能力 (由西向东)	导流效果 (落潮)	导流效果 (涨潮)	总阻力 (落潮)	总阻力 (涨潮)
TZS1	54.72	39.45	34.47	0.33	-2.06	-0.33	-1.02
TZSA	57.23	43.44	36.81	0.53	-2.87	-0.31	-0.99
TZSB	57.26	45.60	42.12	0.65	-3.35	-0.31	-1.00
TZSC	60.05	49.95	39.78	0.94	-4.24	-0.30	-1.00
TZSD	62.53	50.43	40.92	0.85	-4.16	-0.31	-0.99
TZSE	62.33	54.44	42.12	1.22	-5.11	-0.29	-1.03
TZSF	72.14	61.32	54.64	1.51	-7.28	-0.26	-1.07

表2 不同方案主要统计指标增幅对比

统计指标	封堵面积	限流能力 (由东向西)	导流效果 (落潮)
TZSA	2.51	3.99	0.20
TZSB	2.54	6.15	0.32
TZSC	5.33	10.50	0.61
TZSD	7.81	10.98	0.52
TZSE	7.61	14.99	0.89
TZSF	17.42	21.87	1.18

3 结论

1) 通州沙东西水道的落潮分流比从上游的9:1，到下游的8:2，主要分流点在龙爪岩附近的浅滩和通州沙串沟处；涨潮分流比例从下游的6:4到上游的8:2，主要汇流点在龙爪岩附近的浅滩；

2) 通州沙与狼山沙之间存在的串沟与通州沙东水道下段浅区总是相伴而生，串沟的存在不仅不利于滩体的守护，也会对主流起到一定冲散作用。因此通州沙串沟段护滩潜堤，在考虑护滩、导流效果的同时，必须考虑限制串沟的过流来巩固护滩效果；

3) 通过对现状滩面流及串沟分流能力的分析，认为本段航道治理顺堤需加强封堵的位置大致在T3~T8之间，通过多方案比选，综合考虑护滩效果、限流导流作用以及投资效率，通州沙过渡段高程按TZSB来布置较优，可兼顾固滩稳槽与导

流增深双重作用；

4) 本研究为其它类似滩面流及串沟分流河段的整治工程提供了一个研究参考。

参考文献:

- [1] 付中敏, 徐元. 长江南京以下12.5 m深水航道建设一期工程(太仓—南通段)工程可行性研究报告[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2011.
- [2] 戚定满, 顾峰峰, 万远扬. 长江口航道核心计算平台开发研究及成果应用[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2007.
- [3] Wan Yuanyang, Qi Dingman. Preliminary analysis on the impact of different stages of Yangtze Estuary Deepwater Channel Regulation Project[C]// Department of Civil Engineering Tohoku University. Proceedings of the third international conference on estuaries and coasts. Dendai, Japan: Tohoku University. 2009.
- [4] Casulli V. A semi-implicit finite difference method for non-hydrostatic, free-surface flows [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1999, 30: 425-440.
- [5] 万远扬, 吴华林, 沈淇. 长江南京以下12.5 m深水航道一期工程初步设计潮流数模专题研究报告[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2012.

(本文编辑 郭雪珍)