

# 西江三角洲主干水道洪潮水面线变化研究

姚启文<sup>1</sup>,潘玉敏<sup>2</sup>

(1.广东省防汛保障与农村水利中心,广东 广州 510635;2.广东水利电力职业技术学院,广东 广州 510635)

**摘要:**受自然气候和人类活动的影响,西江三角洲主干水道洪潮水面线不同年代存在变化趋势。本文从水面线推算中起推水位、设计流量、河道地形等主导因素入手,应用Mann-Kendall法对控制水文站的水位、潮位、洪峰流量进行趋势分析,收集不同年代河道地形进行河床演变分析,利用MIKE+软件构建一维水动力模型,研究推导出边界条件变化情况下新的洪潮水面线。结果显示:①该水道上中游马口、天河站水位呈下降趋势,中下游大教、竹银站水位变化不大,出海口灯笼山、三灶站有明显上升趋势,控制站马口站洪峰流量有增加趋势;②西江干流水道河床1980—2020年呈现持续下切态势,西海水道的下切程度相对其上游有所减缓,磨刀门水道1980—1999年下切较严重,1999—2020年缓慢回升;③新水面线与以往水面线比较,磨刀门水道水面线抬升,西江干流水道、西海水道水面线基本持平。新水面线对沿线骨干堤防、交通航道工程建设及风暴潮防御工作具有技术支撑作用。

**关键词:**Mann-Kendall;河床演变;MIKE模型;洪潮水面线;西江三角洲

**中图分类号:** 文献标识码:A 文章编号:1001-9235(XXXX)XX-0001-14

珠江三角洲河网分为西江、北江、东江三角洲三片<sup>[1]</sup>,西江三角洲主干流由西江干流水道、西海水道、磨刀门水道三段组成,总长139 km,统称西江三角洲主干水道(图1)。该水道是珠江流域重要的泄洪通道,自上而下分布着樵桑联围、中顺大围、江新联围、中珠联围等广东省重点江堤海堤,出口为八大口门中径流量及纳潮量最大的磨刀门,两岸是粤港澳大湾区腹地,其洪潮水面线的确定对堤防水闸、码头航道等水利交通工程建设及洪水、风暴潮应急防御工作具有重要意义。

为指导江堤海堤建设,广东省水利厅组织了多次洪潮水面线的推算与复核。最早于20世纪80年代初“一查两划”工作期间启动重点江河水面线推算,于1982年颁布东西北江干流及网河区水面线成果<sup>[2]</sup>;后根据“国务院关于清除行洪蓄洪障碍保障防洪安全的紧急通知”要求,开展了广东省境内西、北江干流和珠江三角洲河段行洪控制线划定工作,于

1991年提出了第二套水面线成果<sup>[3]</sup>;第一、第二套水面线均采用1980年前的河道地形,1980—1999年受大规模采砂影响,河床急剧下切并导致洪潮水位、分流比等发生较大改变,广东省水利厅重新组织水面线的复核,以1999年的水文地形资料为依据,于2002年颁布第三套水面线成果<sup>[4-5]</sup>。2000年后,发生了“05·6”西江特大洪水、“08·6”西北江大洪水、2008年“黑格比”台风、2018年“山竹”台风等洪潮灾害,主要测站设计潮位明显上升,河道地形亦处于动态变化中,原有成果已不适应水情、工情变化,迫切需要研究新的洪潮水面线。目前相关部门已开展新的珠三角同步测流,并启动主要河道设计洪潮水面线复核工作。

相关学者就河床地形变化对分流比、水面线的影响做了大量研究。陈小齐等<sup>[6]</sup>基于1999年地形分析了河网地形变化对洪季水动力的影响;苏程佳等<sup>[7]</sup>基于2005年地形探讨了地形变化对洪潮水面

基金项目:广东省水利科技创新项目(2022-01)

收稿日期:2025-12-18 修回日期:2026-03-31

作者简介:姚启文,男,正高级工程师,研究方向为水文与水资源、防灾减灾。

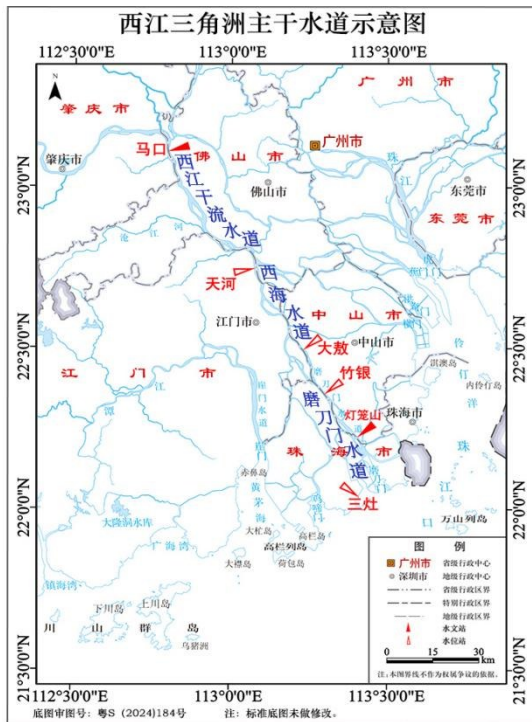


图1 西江三角洲主干水道

Fig. 1 Schematic Diagram of Main Channel in the Xijiang River Delta

线的影响;刘幼萍<sup>[8]</sup>分析了马口、三水站断面地形及各年代分流比、分沙比,揭示了河床垂向冲深、水位流量关系右移、分流分沙比西江下降而北江增加的变化现象。研究方法方面,MIKE、HEC-RAS等数学模型广泛应用于天然河道水面线模拟,其中MIKE模型经过不断改进,由MIKE11发展到MIKE+。本文综合研究风暴潮水位、洪峰流量等变化情势,系统分析1980—2020年河床演变,基于最新的2020年河床地形资料推导新的洪潮水面线,为相关工程建设和洪潮防御提供技术支持。

## 1 资料与方法

### 1.1 测站及数据

西江三角洲主干水道自上而下设置有马口、甘竹、天河、江门(北街)、大敖、竹银、灯笼山、三灶等水文站,选取资料系列较长的6个控制站马口、天河、大敖、竹银、灯笼山、三灶进行研究,水位、流量、潮位资料至2018年,实测大断面及河道地形资料至2020年,资料情况见表1。

表1 水文资料情况

Tab. 1 Hydrological Data Status Table

站名	站点属性	项目	资料序列
马口	水文站	水位	1951—2018年
		流量	1951—2018年
		大断面	1965—2020年
天河	水位站	潮位	1952—2018年
		大敖	水位站
竹银	水位站	潮位	1958—2018年
		灯笼山	水文站
三灶	水位站	大断面	1970—2020年
		潮位	1965—2018年

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 Mann-Kendall法

水位、潮位、洪峰流量的变化研究采用Mann-Kendall非参数检验法<sup>[9]</sup>,对于水文序列 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,在进行趋势检验时,构造其统计量 $S$ 和检验统计量 $Z$ :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (1)$$

$$\text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} -1 & x_j - x_i < 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ +1 & x_j - x_i > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $i, j \leq n$ ,且 $i \neq j$ , $n$ 为总数。

$Z$ 为正值时表示序列存在增加趋势,负值表示减少趋势,给定显著水平 $\alpha$ ,若 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ 时,序列变化显著,反之不显著;根据正态分布表,当 $|Z| \geq 1.28$ 、1.64、1.96、2.58时,表示其分别通过了置信度80%、90%、95%、99%显著性检验。

在进行突变检验时,构造统计量 $d_k$ 、 $UF_k$ 、 $UB_k$ :

$$d_k = \sum_{j=1}^{\{k\}} m_i \quad (2 \leq k \leq n) \quad (5)$$

$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (6)$$

$$D(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (7)$$

$$UF_k = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{D(d_k)}} \quad (8)$$

$$UB_k = -UF_{k'}, \quad k' = n + 1 - k \quad (k, k' = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中: $m_i$ 为 $x_i > x_j$  ( $1 \leq j < i; 1 \leq i \leq n$ )的累计数, $E(d_k)$ 、 $D(d_k)$ 分别为统计量 $d_k$ 的均值和方差。

$UF_k$ 相应于顺序系列, $UB_k$ 相应于逆序系列,给定显著水平 $\alpha$ ,如置信度95%时,临界值 $U_{0.05} = \pm 1.96$ ,将 $UF_k$ 、 $UB_k$ 两个统计量序列曲线和 $\pm 1.96$ 两条直线绘在同一图上,如 $UF_k$ 曲线在临界区内,则趋势不显著,如突破临界线,则趋势显著;若 $UF_k$ 、 $UB_k$ 在临界区内存在交汇点,则交汇点对应的时刻为突变发生的时间。

### 1.2.2 MIKE+一维水动力模型

MIKE一维水动力模型在河道水面线计算中应用广泛<sup>[10]</sup>,其理论基础为圣维南方程组:

质量守恒方程(连续性方程):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b_s \frac{\partial h}{\partial t} = q \quad (10)$$

动量守恒方程(动量方程):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (11)$$

式中: $x$ 、 $t$ 为空间坐标和时间坐标; $Q$ 、 $h$ 为断面流量和水位; $A$ 、 $b_s$ 、 $R$ 分别为断面过水面积、断面宽度和水力半径; $g$ 为重力加速度; $q$ 为单位河长的旁侧入流量; $C$ 为谢才系数; $\alpha$ 为垂向速度分布系数,采用6点Abbott-Ionescu格式求解方程组。

## 2 水位流量变化分析

### 2.1 洪(潮)水位变化

#### 2.1.1 趋势分析

河道最高水位的变化是水面线研究的基础,马口、天河分别是西江干流水道、西海水道入口的控制节点,大敖、竹银、灯笼山是磨刀门水道上、中、下控制节点,三灶代表着磨刀门外海潮水位变化情况。采用Mann-Kendall法<sup>[11]</sup>对6个控制站的年最高水位(潮位)进行趋势分析,结果见表2。

表2 各控制站水(潮)位Mann-Kendall法趋势检验结果

Tab. 2 Results of Mann-Kendall Trend Test for Water (Tidal) Level at Each Control Station

站点	S	n	Var(S)	统计值Z	趋势	显著性(95%置信度)
马口	-421	68	35 689	-2.2	下降	显著
天河	-231	67	34 148	-1.1	下降	不显著
大敖	148	67	34 148	0.8	上升	不显著
竹银	138	61	25 823	0.9	上升	不显著
灯笼山	343	60	24 583	2.2	上升	显著
三灶	251	54	17 967	1.9	上升	不显著

由表2可以看出,6个站呈现不同的变化趋势,西江干流水道、西海水道的马口、天河水位呈现下降趋势,特别是马口站,其Z值为-2.2,在95%置信度水平下降趋势显著;其余4站呈上升趋势,其中大敖、竹银两站趋势不显著,Z值分别为0.8、0.9;而灯笼山在95%置信度水平上升趋势显著,其Z值为2.2;三灶站Z值为1.9,显著性水平未达95%但超过90%。可见,西江三角洲主干水道中上段水位呈下降趋势,中下段变化不明显,而下游及出海口潮位呈上升趋势。

基于西江三角洲主干水道上游及出海口情况,初步分析这些变化与几方面因素有关:一是河道断面发生变化,横向及纵向变化引起过水面积改变,从而在同级流量情况下水位发生变化;二是洪峰流量的变化,历年洪峰流量发生一定程度的增加或减少,将引起相应水位的上升或下降;三是与外海潮

汐动态有关,海平面上升或潮动力增强,对感潮内河水位会产生直接的影响。

### 2.1.2 突变分析

选取变化趋势较显著的马口、灯笼山、三灶站进行突变分析,给定显著性水平为0.05、0.01,结果见图2。由图中 $UF_k$ 线的分布及 $UF_k$ 、 $UB_k$ 的交点情况可知:①马口站1951—1956、1969—1979、1991—1998年最高水位呈上升趋势,且在1956年突破0.05显著性水平线;1980—1990、1999—2018年最高水位呈下降趋势,且在2018年突破0.05显著性水平线;在0.05显著水平临界区间内, $UF_k$ 、 $UB_k$ 的交点在2009年,说明在2009年发生下降突变;②灯笼山站1970—1975、1982—2018年最高水位呈上升趋势,且在1974、1996—1998、2018年突破0.05显著性水平线,1965—1969、1976—1981年最高水位呈下降趋势,在0.05显著水平临界区间内, $UF_k$ 、 $UB_k$ 主要的交点有1966、1985年,分别发生了下降、上升的突变;③三灶站1970—1974、1985—2018年最高水位呈上升趋势,且在1985年突破0.05显著性水平线,1966—1969、1975—1984年最高水位呈下降趋势,且在1983年突破0.05显著性水平线;在0.05显著水平临界区间内, $UF_k$ 、 $UB_k$ 存在多个交汇点,主要的交点有2008、2015年,说明这些年份三灶站年最高潮位发生突变。

### 2.2 洪峰流量变化

马口站是西江三角洲的控制水文站,代表上游西北江于思贤窖汇流后又经西、北江干流水道分流的西江三角洲流量占比<sup>[12]</sup>。分析马口站1951—2018年的洪峰流量,排位前5的年份及洪峰流量依次为:2005年 $53\ 200\text{m}^3/\text{s}$ 、1994年 $47\ 000\text{m}^3/\text{s}$ 、1998年 $46\ 200\text{m}^3/\text{s}$ 、2008年 $45\ 900\text{m}^3/\text{s}$ 、1997年 $43\ 800\text{m}^3/\text{s}$ ,洪峰流量年际过程线见图3,可以看出,在1994—2008年有明显的连续高峰,在68 a的实测长系列中,排位前5的均在该段时期内。对马口站洪峰流量进行趋势分析,结果见表3,其Z值为1.5,通过了置信度80%水平但未达95%,说明洪峰流量有一定的增加趋势,但不显著,其增加与堤防约束导致洪水归槽及三角洲分流比的变化有一定关系。

## 3 变化原因分析

### 3.1 河床演变情况

#### 3.1.1 水文站大断面分析

马口站洪峰流量的增加趋势与上述水位在1991—1998年呈上升趋势是一致的,但1999年后水位呈下降趋势则是河床地形起主导作用<sup>[13]</sup>。选取马口、灯笼山站代表年份实测大断面资料进行对比,结果见表4,两站大断面变化见图4。可以看出:①马口大断面总体呈现下切态势,从1970—2020年,深泓点高程、平均河底高程持续降低,河相系数减小,平滩水位以下面积增大。在此期间存在2个分层,1970—1999年约30年间虽有下切但幅度不大,1999—2020年20年间,大断面向宽深方向发展,与1999年对比,2008、2020年平滩水位以下面积分别扩大了12%、29%。马口附近河床地形的变化,是导致水位流量关系线右移,同级流量水位下降的直接原因;②灯笼山大断面下切程度相对较轻,1970—1990年基本稳定,1999年后河底高程开始下降,平滩水位以下面积增大,从断面图看边滩有一定程度挖深,2020年与2008年比较变化不大并有一定程度回淤。由于灯笼山站在出海口门附近,其水位变化主要受外海潮汐影响。

#### 3.1.2 河段河床演变分析

西江三角洲主干水道系统河道地形测量有3个阶段,1977—1987年所测统称1980地形,1999、2020年均有所测量,在进行广东省主要河道采砂控制规划时,对1980—1999年约20年间的河床演变有深入分析<sup>[14]</sup>,在此基础上对1999—2020年的演变进一步研究。西江干流水道、西海水道、磨刀门水道的河床演变参数见表5,河床平均高程变化见图5。①西江干流水道河床40多年间呈现持续下切态势,河底平均高程1999年比1980年下降0.9 m,2020年比1999年下降1.64 m;河相系数和河道容积的变化类似,后20年比前20年河道向纵深发展的程度更大,河道容积2020年比1999年增加了15%;在三个河道的比较中,该河道的变化更剧烈。②西海水道同样呈持续下切态势,但程度相对其上游有所减缓,河



图2 年最高水(潮)位 Mann-Kendall 法突变检验

Fig. 2 Mutation Test Chart of Annual Maximum Water (Tidal) Level by Mann-Kendall Method

底平均高程 1999 年比 1980 年下降 1.13m, 2020 年比 1999 年下降 0.8 m; 河相系数在减小, 河道容积 2020 年比 1999 年增加了 12%。③磨刀门水道变化与上游不同, 前 20 年下切较严重, 后 20 年缓慢回升。河底平均高程 1999 年比 1980 年下降 1.91m, 2020 年比 1999 年上升 0.17 m; 河相系数先减小后增加, 河道容积 2020 年比 1999 年减少 3%。

西江主干水道河床地形变化与开挖疏浚等人类活动尤其是采砂密切相关, 珠江三角洲在 2005 年

后实施了全面禁采, 磨刀门水道的回淤体现了禁采措施的成效。结合对航道部门施测的 2008 年主航道地形分析, 西江干流水道、西海水道在 2008 年下切到最深, 之后局部河段有轻微回淤, 但由于上游来沙量减少<sup>[15]</sup>, 中上游的冲刷下切态势仍未根本扭转, 这是造成中上段水位呈下降趋势的根本原因。

### 3.2 潮汐动力改变

西江三角洲主干水道下游及出海口水位上升趋势则与广东沿海风暴潮动力加剧有关<sup>[16]</sup>, 磨刀门

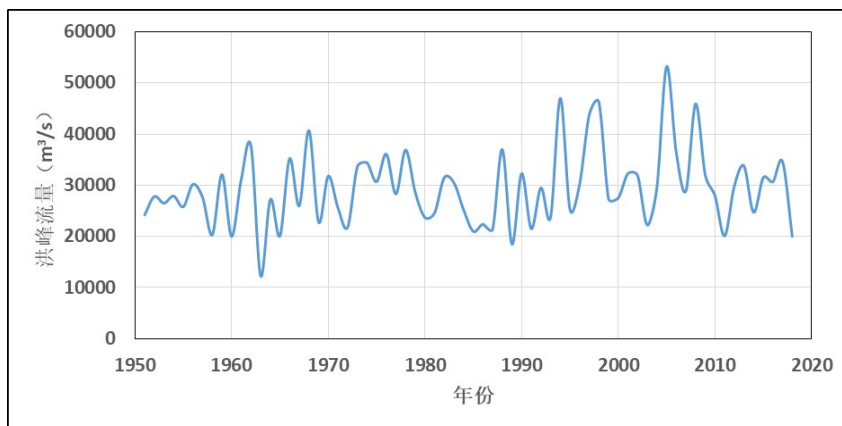


图3 马口站洪峰流量年际过程线

Fig. 3 Interannual Hydrograph of Flood Peak Discharge at Makou Station

表3 马口站洪峰流量Mann-Kendall法趋势检验结果

Tab. 3 Results of Mann-Kendall Trend Test for Flood Peak Discharge at Makou Station

S	n	Var(S)	统计值Z	趋势	显著性(95%置信度)
274	68	35 689	1.5	增加	不显著

灯笼山、三灶站最高潮位的变化趋势与珠江三角洲其他口门的上升趋势一致<sup>[17]</sup>,粤东、粤西沿海亦出现类似态势。如广州市珠江河道中大、黄埔站最高潮位呈上升趋势,且中大站显著上升<sup>[18]</sup>;粤西沿海南渡、湛江港、北津港潮水位也出现一定程度上升<sup>[19]</sup>,上述变化是2000年后超强台风频发的结果。同时,气候变化导致海平面上升<sup>[20]</sup>也是一个重要因素。

## 4 新水面线推算

### 4.1 边界条件

西北江三角洲是水利联系密切的整体系统,本研究从偏于对工程不利的考虑出发,参考“堤库结合”防洪系统中以“上游水库”为主与以“下游区间”为主的思路,以“西江三角洲”为主采用一维数学模型进行推算,分以洪为主及以潮为主两种工况,均以各级频率对应多年平均的组合,取外包线为设计成果。本研究以思贤滘(马口站)为上边界、磨刀门(三灶站)为下边界,河道断面采用2020年实测河道地形,对西江三角洲主干水道各级频率洪潮水面线进行推算。其中三灶站起推水位按延长系列后的设计水位,马口站洪峰流量按《珠江流域主要水文设计成果复核报告》成果,分叉河道的分流比根据

表4 马口、灯笼山站实测大断面参数

Tab. 4 Measured Cross-Section Parameters at Makou and Denglongshan Stations

年份	深泓点(珠基:m)		平均河底高程(珠基:m)		河相系数		平滩水位以下面积/10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup>	
	马口	灯笼山	马口	灯笼山	马口	灯笼山	马口	灯笼山
1970	-18.06	-11.52	-8.35	-4.82	2.4	4.6	14.9	5.0
1980	-19.10	-12.14	-7.39	-4.06	2.5	5.3	15.0	4.6
1990	-19.08	-12.16	-10.05	-3.94	2.0	5.4	14.6	5.0
1999	-20.91	-12.97	-11.78	-7.95	1.8	2.8	16.4	5.7
2008	-22.89	-14.09	-14.76	-8.77	1.6	2.6	18.9	6.4
2020	-23.12	-14.00	-16.42	-6.05	1.5	3.7	19.0	6.5

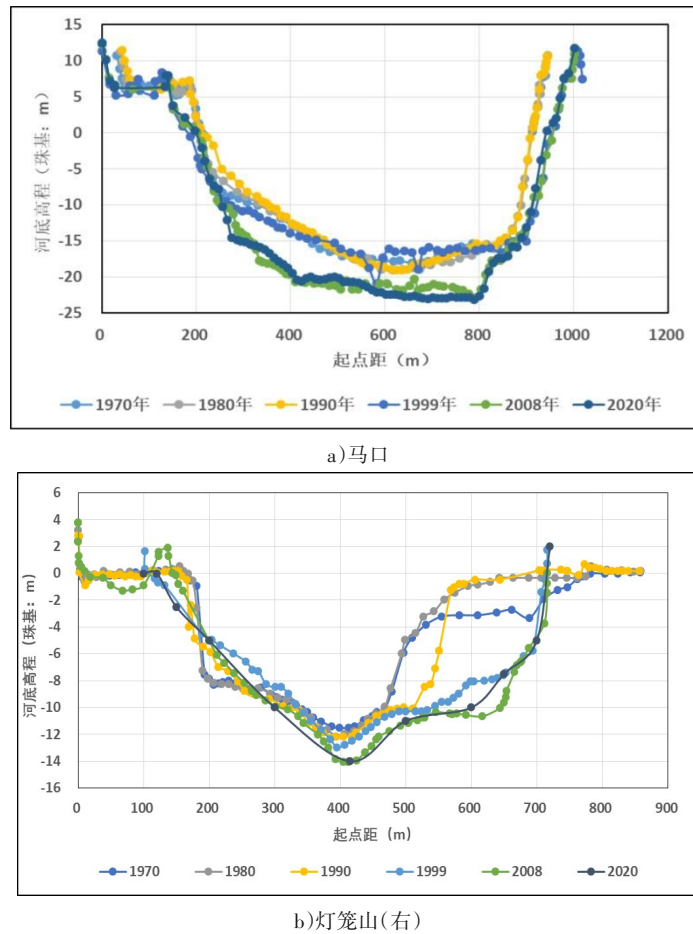


图4 马口、灯笼山(右)实测大断面站年代变化

Fig. 4 Chronological Changes of Measured Major Cross-Sections at Makou Station and Denglongshan Station (Right)

表5 西江三角洲主干水道河床演变参数

Tab. 5 Parameters of Riverbed Evolution in Main Channels of the Xijiang River Delta

河道	平均河底高程/m			平均河相系数			河道容积/亿 m <sup>3</sup>			
	1980	1999	2020	1980	1999	2020	1980	1999	2020	(2020—1999)/1999 %
西江干流水道	-8.26	-9.16	-10.8	3.97	3.54	2.63	7.9	8.6	9.9	15
西海水道	-6.17	-7.3	-8.10	3.86	3.37	2.70	1.5	1.7	1.9	12
磨刀门水道	-4.49	-6.4	-6.23	5.67	3.96	4.25	2.7	3.5	3.4	-3

1999、2008年两次同步测流<sup>[21]</sup>的分析,结合1991水面线推算所采用的各河段设计流量综合确定。

MIKE 一维水动力模型参数的率定与验证<sup>[22]</sup>依据两次同步测流的水文数据,以1999年7月洪水进行率定,同步测验期间洪峰流量 26 800 m<sup>3</sup>/s;以2008年6月洪水进行验证,洪峰流量 45 900 m<sup>3</sup>/s,相当于50年一遇洪水量级,河道断面分别依据1999、2020

年实测地形。由于两场洪水在量级上有一定差距,以相同参数进行2008年洪水验证时,部分站点水位拟合度不足,通过调整参数,控制实测与模拟水位差值在±0.1 m以内<sup>[23]</sup>。水面线推算的边界条件见表6、7。

#### 4.2 成果对比

根据上述边界条件推算了100、50、20年一遇洪

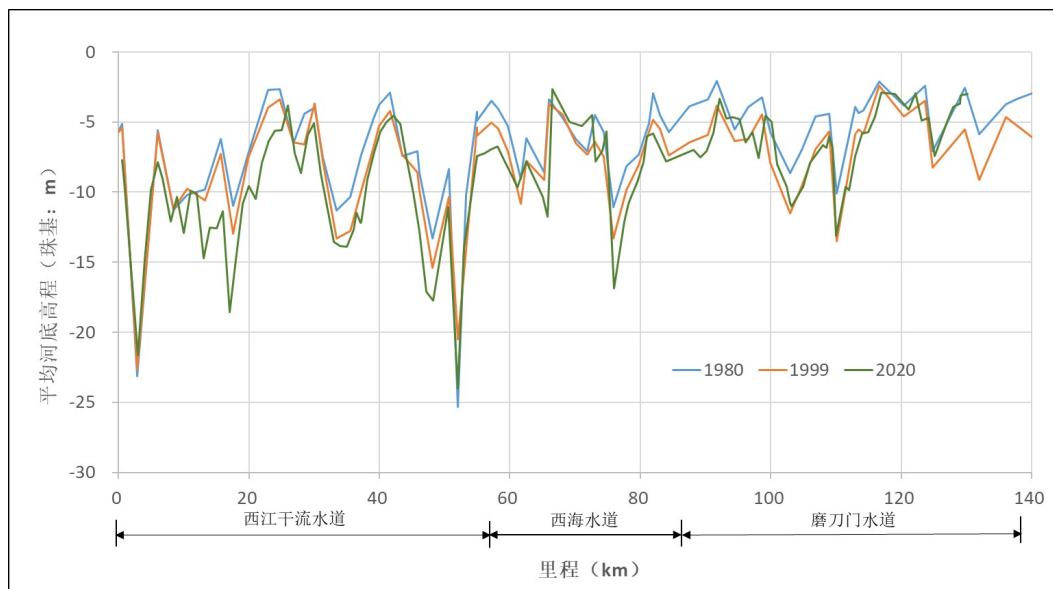


图5 西江三角洲主干水道平均河底高程年代变化

Fig. 5 Chronological Variation of Mean Riverbed Elevation in Main Channels of the Xijiang River Delta

表6 设计洪水与设计潮位

Tab. 6 Design Floods and Design Tidal Levels

站名	设计洪水(m <sup>3</sup> /s)				站名	设计潮位(珠基:m)			
	均值	P=1%	P=2%	P=5%		均值	P=1%	P=2%	P=5%
马口	29 100	48 900	46 000	41 800	三灶	1.80	3.68	3.30	2.81

潮水面线,西江三角洲防洪保护区设防标准多为100年一遇,防洪体系为堤库结合,在上游龙滩、大藤峡水利枢纽联合调洪下把100年一遇洪水降为50年一遇,因此研究河段两岸堤防标准多为50年一遇。本次及以往历次推算的基础条件见表8,主干河道50年一遇水面线见图6。

a)西江干流水道。该水道各年代水面线相差不大,在0~10 km河段,2002年水面线最高,10~57.5 km河段,1982年水面线最高;本次推算水面线在0~30 km河段处于最低位置,30~57.5 km河段处于中间位置。河床地形变化是该水道水面线高低的主要影响因素,其次是洪峰流量及外海潮位的影响。20世纪80年代前未受人采砂影响,河床稳定,水面线较高;随着河床持续下切,特别是马口水文站附近河床下切严重,导致该水道上游水面线降低;而该水道下段,受洪峰流量增加、外海潮位抬升

和河床下降的综合影响,本次水面线处于中间位置。

b)西海水道。在57.5~78 km河段,1982年水面线最高,1991年水面线最低,相差最大位置在63 km处,相差0.7 m,本次推算水面线处于中间位置;78~85 km河段本次推算水面线最高,该水道外海潮位抬升因素比河床下切因素影响更甚。

c)磨刀门水道。受外海潮位抬升的影响,水面线变化较大,尤其在100~139 km的出海口河段,而85~100 km相差不大。全线均为本次推算水面线最高,在出海口位置最大相差1.7 m,该水道地形及流量作用微小,风暴潮加剧导致设计潮位显著升高是主导因素。

全河道而言,基本在78 km以上1982年水面线最高,78 km以下本次推算水面线最高。1982年水面线反映了未受人类活动影响的情况,1991、2002年水面线反映采砂导致河床下切的情况,本次水面线是河床下切及2000年后风暴潮加剧综合影响的结果,合理反映了自然气候、水文情势的变化,切合现状河道地形。考虑到基建规模下降、全流域禁采等因素,未来河床有可能继续回淤,在实际应用中,建议采用各时期外包线进行工程的建设或加固,即

表7 分汊河段分流比及50年一遇设计流量  
Tab. 7 Distribution Ratios and 50-Year Return Period  
Design Discharges in Braided Reaches

河道	河段	设计流量	分流比/%
西江干流水道	主干	46 000	100
	太平沙左	28 000	61
	太平沙右	18 000	39
	西海水道	25 300	55
	东海水道	19 800	43
西海水道	甘竹溪	900	2
	主干	25 300	100
	古镇(海洲)水道(左)	2 250	9
	荷塘水道(中)	13 700	54
	北街水道(右)	9 350	37
	主干(上段)	24 000	95
	江门水道	1 300	5
	主干(上段)	24 000	100
	磨刀水道(大敖岛左)	11 000	46
	石板沙水道(大敖岛右)	13 000	54
磨刀门水道	主干(中段)	16 800	70
	其他(虎跳门水道等)	7 200	30
	主干(中段)	16 800	100
	神湾水道(磨刀岛左)	2 700	16
	磨刀水道(磨刀岛右)	14 100	84
	主干(下段)	16 800	100

的河床下切有关,后者则与广东沿海风暴潮动力加剧有关;②西江干流水道、西海水道河床呈持续下切态势,1999—2020年下切速率变缓;磨刀门水道1980—1999年下切较严重,1999—2020年缓慢回升,反映采砂、禁采等人为因素与天然河道演变的综合作用;③受风暴潮加剧引致口门设计潮位大幅抬升影响,磨刀门水道洪潮水面线升高,西海水道、西江干流水道下段变化不大,西江干流水道上段受河床下切影响水面线降低。各河段水面线变化是大尺度气候系统与人类活动共同作用所引起。

由于河床地形处于动态演变中,近年来珠三角实施禁采后,河床急剧下切的态势已得到遏制,部分河段缓慢淤积回升,在堤防等水利工程建设中,考虑未来的不利情况组合,建议采用各年代水面线中最高的进行工程建设,对未达标的堤段进行加固加高,已达标的堤段不降低高度。本次仅采用一维水动力模型,并限于西江三角洲主干水道,后续进一步采用二维数学模型,以整个三角洲统一研究,对于每一个水道,宜按对于该水道最不利的情况进行分析采用。

对于水面线降低的河段,维持原堤防高度;对于水面线升高的河段,对堤防进行加高加固。

## 5 结语

本文应用60多年水文资料及40多年地形资料,基于Mann-Kendall法趋势分析、河床演变分析、MIKE+一维水面线推算三大工作,研究剖析了西江三角洲主干水道洪潮水位、洪峰流量的变化及其原因,根据延长系列后设计潮位及最新河道地形推导了洪潮水面线,主要结论如下:①6个控制站年最高水(潮)位呈不同变化趋势,马口、天河水位下降,大敖、竹银、灯笼山、三灶上升,前者与人为采砂导致

表 8 各次水面线推算边界条件

Tab. 8 Boundary Conditions for Water Surface Profile Calculation of Each Scenario

项目	马口站洪峰流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )		下游潮位(珠基:m)		地形资料年份
1982年水面线	<i>P</i> =1%	46 736	三灶	2.22	1980河道地形
	<i>P</i> =2%	43 747		2.12	
	<i>P</i> =5%	40 203		1.98	
1991年水面线	<i>P</i> =1%	—	灯笼山	—	1980河道地形
	<i>P</i> =2%	43 747		1.59	
	<i>P</i> =5%	40 203		1.58	
2002年水面线	<i>P</i> =1%	49 276	灯笼山	2.48	1999河道地形
	<i>P</i> =2%	47 169		2.34	
	<i>P</i> =5%	44 149		2.14	
本次水面线	<i>P</i> =1%	48 900	三灶	3.68	2020河道地形
	<i>P</i> =2%	46 000		3.30	
	<i>P</i> =5%	41 800		2.81	

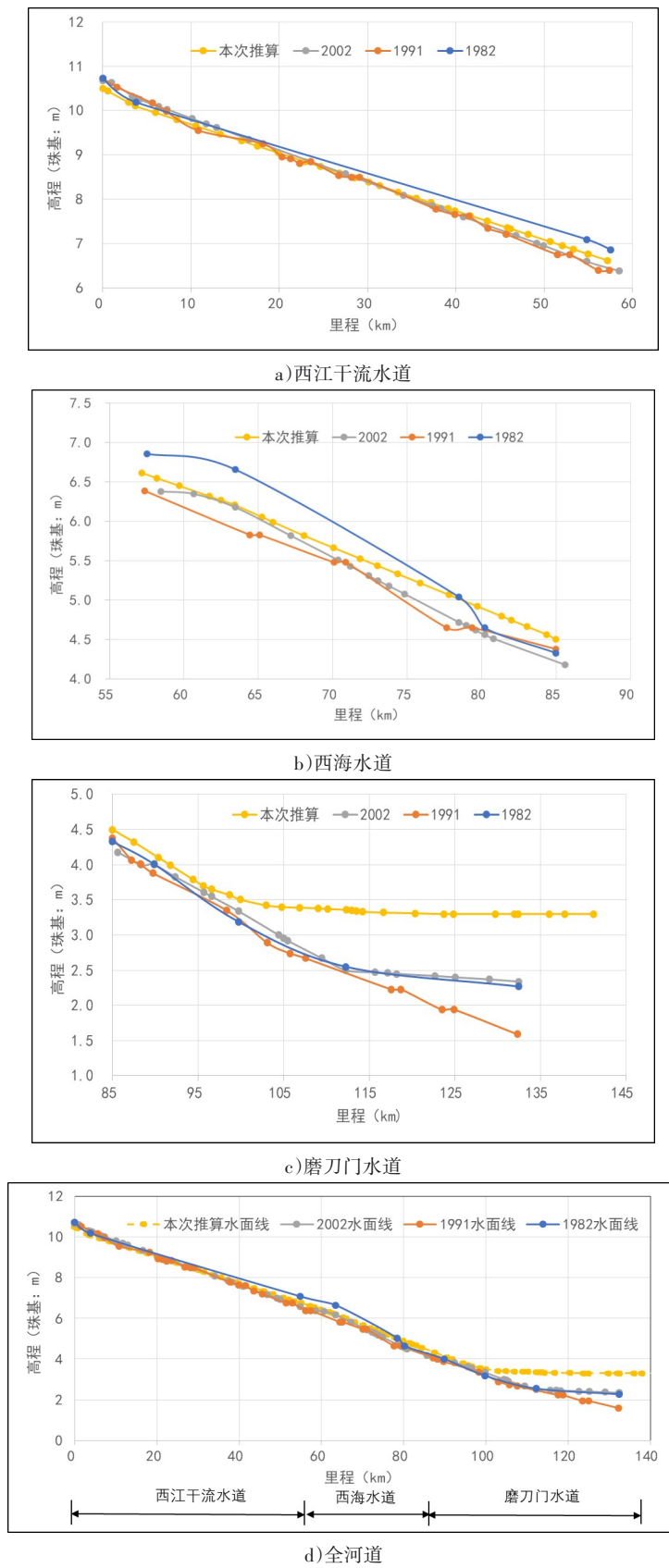


图6 西江三角洲主干水道各年代50年一遇水面线

Fig. 6 50-Year Return Period Water Surface Profiles in Main Channels of the Xijiang River Delta in Different Periods

## 参考文献:

- [1] 袁菲, 陈文龙, 胡晓张, 等. 珠江三角洲顶点思贤滘分流自适应调节机制[J]. 水科学进展, 2023, 34(4): 610-621.  
YUAN Fei, CHEN Wenlong, HU Xiaozhang, et al. Adaptive regulation mechanism of the Sixianjiao channel at the apex of the Pearl River Delta for flow diversion [J]. Advances In Water Science, 2023, 34(4): 610-621. (in Chinese)
- [2] 谢汉祥, 向旭. 西、北江干流及网河区洪、潮水面线计算[J]. 水利规划, 1997(1): 6-10.  
Xie Hanxiang, Xiang Xu. Calculation of flood and tide lines in the main stream of the West and North Rivers and Wanghe River [J]. Water Resources Planning, 1997(1): 6-10. (in Chinese)
- [3] 广东省东、西、北江干流及珠江三角洲网河区划定河道行洪控制线成果报告[R]. 广州, 1991.  
Report on the results of the demarcation of the river flood control line in the main stream of the east, west and north rivers in Guangdong Province and the river network area of the Pearl River Delta [R]. Guangzhou, 1991. (in Chinese)
- [4] 西、北江下游及其三角洲网河河道设计洪潮水面线(试行)[R]. 广州: 广东省水利水电科学研究院, 2002.  
Design of flood tide water lines in the lower reaches of the West and North Rivers and their delta network rivers [R]. Guangzhou: Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, 2002. (in Chinese)
- [5] 黄东, 黄本胜, 郑国栋, 等. 西、北江下游及其三角洲网河河道设计洪潮水面线计算[J]. 广东水利水电, 2002(4): 5-7.  
Huang Dong, Huang Bensheng, Zheng Guodong, et al. Calculation of the flood tide surface line of the design of the lower reaches of the West and North Rivers and their delta network rivers [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2002(4): 5-7. (in Chinese)
- [6] 陈小齐, 余明辉, 刘长杰, 等. 珠江三角洲近年地形不均匀变化对洪季水动力特征的影响[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 83-92.  
Chen Xiaoqi, Yu Minghui, Liu Changjie, et al. Impact of recent uneven channel evolution on hydrodynamic characteristics during flood season in the Pearl River Delta [J]. Advances In Water Science, 2020, 31(1): 83-92. (in Chinese)
- [7] 苏程佳, 陈晓宏, 唐亦汉, 等. 河道地形变化对洪潮水面线的影响分析: 以西北江三角洲河网为例[J]. 水文, 2018, 38(3): 13-20, 28.  
Su Chengjia, Chen Xiaohong, Tang Yihan, et al. Impact of River Terrain Change on Flood Tide Water Surface Profile: A Case Study of River Network in West and North River Delta [J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(3): 13-20, 28. (in Chinese)
- [8] 刘幼萍. 珠江三角洲河网区变化环境下的河床演变趋势和水文极端事件[J]. 水文, 2020, 40(3): 71-75.  
LIU Youping. Tendency of Fluvial Process and Hydrologic Extreme Events in River Network of Pearl River Delta under Changing Environment [J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(3): 71-75. (in Chinese)
- [9] 刘斯文, 刘海隆, 王玲. MIKE SHE模型的发展与应用研究[J]. 水文, 2018, 38(5): 23-28.  
Liu Wenwen, Liu Hailong, Wang Ling. Development and Application of MIKE SHE Model [J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(5): 23-28. (in Chinese)
- [10] 高彬, 梁士奎, 王兴伟. 基于MIKE 11和HEC-RAS的模拟水面线比较及敏感性分析[J]. 水利规划与设计, 2024(1): 58-60.  
Gao Bin, Liang Shikui, Wang Xingwei. Comparison and sensitivity analysis of simulated water surface lines based on mike11 and Hec-ras [J]. Water Resources Planning and Design, 2024(1): 58-60. (in Chinese)
- [11] 潘玉敏. 珠江三角洲广州市河段及八大口门设计潮位分析研究[J]. 水利规划与设计, 2024(6): 26-32.  
Pan Yumin. The Analysis of the Tide Levels Design for the Guangzhou Reach and the Eight Major Estuary of the Pearl River Delta [J]. Water Resources Planning and Design, 2024(6): 26-32. (in Chinese)
- [12] 任成均. 基于Copula函数的西北江洪水遭遇分析[J]. 人民珠江, 2023, 44(10): 149-156.  
Ren Chengjun. Analysis of Floods in Xijiang River and Beijiang River Based on Copula Function [J]. Pearl River, 2023, 44(10): 149-156. (in Chinese)
- [13] 刘培, 黄鹏飞, 许劫靖, 等. 西、北江三角洲洪水位对洪水归槽与河床下切的响应[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(3): 501-511.  
Liu Pei, Huang Pengfei, Xu Jiejing, et al. Response of flood level to flood returning to main channel and channel deepening in the West and North River Delta [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(3): 501-511. (in Chinese)
- [14] 李静. 珠江三角洲网河近20年河床演变特征分析[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(3): 15-17, 20.  
Li Jing. Characteristic analysis of fluvial process of river network in Pearl River Delta for recent 2 decades [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(3): 15-17, 20. (in Chinese)
- [15] 赖国友, 刘宏坤, 文丽. 西江干流广东段近期输沙变化趋势研

- 究[J]. 水利规划与设计, 2023(12):37-43.
- Lai Guoyou, Liu Hongkun, Wen Li. Study on recent trends of sediment transport in the Guangdong section of Xijiang main stream [J]. Water Resources Planning and Design, 2023 (12): 37-43. (in Chinese)
- [16] 许劫婧, 叶荣辉, 刘培, 等. 珠江河口风暴潮增水特征及经验预报[J]. 水利水运工程学报, 2024(6):65-74.
- Xu Jiejing, Ye Ronghui, Liu Pei, et al. Characteristics of storm surge water level and empirical forecasting at the Pearl River Estuary [J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(6): 65-74. (in Chinese)
- [17] 刘斌, 闻平, 刘丽诗, 等. 近几十年来珠江三角洲主要水文站设计洪潮水位变化原因分析[J]. 人民珠江, 2018, 39(4): 5-11.
- Liu Bin, Wen Ping, Liu Lishi, et al. Analysis on the Causes of the Design Flood Level of the Main Hydrological Station in the Pearl River Delta in Recent Decades [J]. Pearl River, 2018, 39(4): 5-11. (in Chinese)
- [18] 张杰. 广州市珠江河口高潮位变化特征分析[J]. 人民珠江, 2019, 40(9): 23-27.
- Zhang Jie. Analysis on the Variation Characteristics of High Tide Level at Estuary of the Pearl River in Guangzhou [J]. Pearl River, 2019, 40(9): 23-27. (in Chinese)
- [19] 姚启文, 阮琼瑶, 潘玉敏. 粤西沿海潮水位变化趋势及设计潮位分析研究 [J]. 水文, 2025, 45(1):76-82.
- Yao Qiwen, Ruan Qiongyao, Pan Yumin. Study on the Trends of Tide Level Changes and Design Tide Level in the Coastal Areas of Western Guangdong [J]. Journal of China Hydrology, 2025, 45(1):76-82. (in Chinese)
- [20] 胡耀辉, 王志力, 张娟, 等. 海平面上升对珠江口风暴潮的影响分析[J]. 人民珠江, 2025, 46(5):1-9.
- Hu Yaohui, Wang Zhili, Zhang Juan. Influence of Sea Level Rise on Storm Surges in the Pearl River Estuary [J]. Pearl River, 2025, 46(5):1-9. (in Chinese)
- [21] 珠江三角洲汛期同步水文测验成果分析报告 [R]. 广州: 广东省西江流域管理局, 2008.
- Analysis Report on the Results of Synchronous Hydrometric Test in the Flood Season of the Pearl River Delta [R]. Guangzhou: Xijiang River Basin Administration of Guangdong Province, 2008. (in Chinese)
- [22] 卢真建. 基于MIKE模型的湛江水面线计算分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(10):6-11.
- Lu Zhenjian. An Analysis of Water Surface Line of the Pajiang River Based on MIKE Model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(10):6-11. (in Chinese)
- [23] 钟黎雨, 余超. 基于MIKE模型的珠江三角洲洪潮数值模拟分析[J]. 人民珠江, 2023, 44(S2):151-157.
- Zhong Liyu, Yu Chao. Numerical Simulation of Flood Tide in Pearl River Delta Based on MIKE Model [J]. Pearl River, 2023, 44(S2):151-157. (in Chinese)

## Study on Variation of Flood-Tidal Water Surface Profiles in Main Channel of the Xijiang River Delta

YAO Qiwen<sup>1</sup>, Pan Yumin<sup>2</sup>

(1. Guangdong Provincial Flood Control support and Rural Water Conservancy Center, Guangzhou 510635, China; 2. Guangdong Polytechnic of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510635, China)

**Abstract:** The main channels of the Xijiang River Delta are important flood discharge passages of the Pearl River, a major river in southern China. Both banks are located in the hinterland of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Affected by natural climate variability and human activities, the flood tide water surface profile (FTWSP) of the main channels in the Xijiang River Delta has shown varying trends over different periods. This study starts from key influencing factors in FTWSP calculation—such as initial water level, design discharge, and channel topography—applies the Mann-Kendall test method to conduct trend analysis on water level, tidal level, and flood peak discharge at key hydrological stations, and collects riverbed topography data from different periods to analyze riverbed evolution. A one-dimensional hydrodynamic model is constructed using MIKE+ software to investigate new FTWSPs under changing boundary conditions. The results show: ① The water levels at Makou and Tianhe stations in the upper and middle reaches of the channel show a decreasing trend, while those at Da'ao and Zhuyin stations in the middle and lower reaches show little change, and water levels at the estuary stations, Denglongshan and Sanzhao, exhibit a significant rising trend. The flood peak discharge at Makou

Station shows an increasing trend; ② The main channel of the Xijiang River has experienced continuous channel deepening from 1980 to 2020. The degree of channel deepening in the Xihai Channel is relatively moderate compared to its upstream, while the Modaomen Channel experienced severe incision from 1980 to 1999, followed by a slow rebound from 1999 to 2020; ③ Compared with historical FTWSPs, the FTWSP in the Modaomen Channel has risen, while those in the main Xijiang River channel and Xihai Channel remain generally unchanged. The updated FTWSP provides technical support for the construction of key embankments, navigation infrastructure, and storm surge defense along the river.

**Keywords:** Mann-Kendall test; riverbed evolution; MIKE model; flood tide water surface profile; Xijiang River Delta

(责任编辑:向 飞)