

· 航道及通航建筑物 ·



长江徐六泾河段深潭演变特征及对隧道建设的影响^{*}

胡 鹏¹, 杜德军², 徐 华², 张 胡¹

(1. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430050; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 以实测资料为基础, 对长江下游徐六泾河段深潭的发育、发展等演变特征及活动性进行分析。结果表明, 2003年前, 主槽最低点一般在-40 m以内, 无明显的深潭存在。2003年后, 受苏通长江大桥等工程建设影响, 出现-40 m以下深潭。此后, 随上游来沙减少及两岸徐六泾节点整治工程实施, 深潭冲深发展; 2007年后冲刷至-50 m左右, 2020年刷深至-70 m以下。相关研究表明, 桥梁工程对水动力和河床冲淤的影响范围一般在5~6 km, 加之徐六泾河段下段为展宽段, 水流减缓, 深潭无明显冲刷下移的趋势, 对下游海太过江隧道的布设不会造成明显影响; 但考虑深潭冲深发展, 需加强对深潭变化的监测。

关键词: 河床演变; 深潭; 冲淤; 海太隧道; 埋深

中图分类号: U611; TV123

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0065-07

Evolution characteristics of deep pools in Xuliujing reach of the Yangtze River and its impact on tunnel construction

HU Peng¹, DU Dejun², XU Hua², ZHANG Hu¹

(1. China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430050, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on the measured data, the evolution characteristics and activities of deep pools in the Xuliujing reach of the lower reaches of the Yangtze River are analyzed. The results show that before 2003, the lowest point of the main trough was generally within -40 m, and there was no obvious deep pool. After 2003, under the influence of the construction of Sutong Bridge and other projects, deep pools below -40 m appeared. Since then, with the reduction of upstream sand and the implementation of the regulation project of Xuliujing node on both banks, the deep pool has been scoured to about -50 m after 2007 and below -70 m by 2020. Relevant research shows that the impact range of bridge works on hydrodynamic forces and riverbed scouring and silting is generally 5~6 km. In addition, the lower section of Xuliujing River is an extended section with slow flow, and there is no obvious trend of scouring and moving down for deep pools, which will not cause significant impact on the layout of Haitai tunnels downstream. However, considering the development of deep pool flushing, it is necessary to strengthen the monitoring of deep pool changes.

Keywords: riverbed evolution; deep pool; scouring and silting; Haitai tunnel; buried depth

长江河道内水流的作用使得地貌发生变化, 河流沿程及河道断面深浅相间, 较深的区域为深槽, 较浅的区域为边滩或心滩。深槽一般为河道的主槽, 当遇到特殊的地质、人类活动等因素时, 出现

局部水深大于深槽深度的深穴, 称为深潭^[1]。由于深潭常年位于水下, 因此对深潭的具体特征及其发展缺乏直观的了解, 其冲淤变化、移动可能会带来一系列的影响, 主要表现在: 近岸深潭变化影响岸

收稿日期: 2022-12-19

*基金项目: 国家重点研发计划资助(2022YFC3204500); 江苏省水利科技项目(2020002)

作者简介: 胡鹏 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程设计、咨询研究工作。

坡稳定；主槽深潭变化会引起主槽局部变化；工程附近深潭变化影响工程稳定。国内许多学者对深潭的成因和影响进行了研究，杨达源等^[2]通过对长江三峡河段深槽的研究，认为深潭是在主槽的相对宜冲刷地段由跌水掏蚀与急流冲刷形成的；张丽萍等^[3]通过对分布密集的长江渝宜河段深槽的研究，认为其成因是在特定地质构造、岩性组成的背景基础上，主要由水动力波动、束流、环流、泡水作用所致；杜德军等^[4]在长江南支研究中提出，隧道埋设应考虑线位附近历史上曾出现的深潭；李伯昌等^[5]、胡鹏等^[6]分析了河势条件对隧道布设的影响。

上述研究主要针对深潭的形成及其冲淤变化对河势等方面的影响，对受径潮流影响、邻近涉水工程作用下的深潭成因、活动性及其影响未涉

及。本文以长江下游徐六泾深潭为例，在实测资料分析的基础上，结合周边围垦、苏通长江大桥等工程建设，从成因、演变特征及移动特性等方面分析其对海太过江隧道布设的影响，为隧道线位选址及布设等提供依据。

1 河道概况

长江下游徐六泾—白茆河口为徐六泾节点段，最窄处河宽约 4.7 km，白茆河口附近河宽约 7.5 km，两岸近岸分别有白茆小沙及新通海沙，左岸的新通海沙大部分已圈围成陆，右岸的白茆小沙分为上、下两块沙体，呈上、下交错状排列，近年下沙体冲刷严重，已基本消失，主槽偏靠右岸。徐六泾深潭位于苏通长江大桥下游（图 1）。

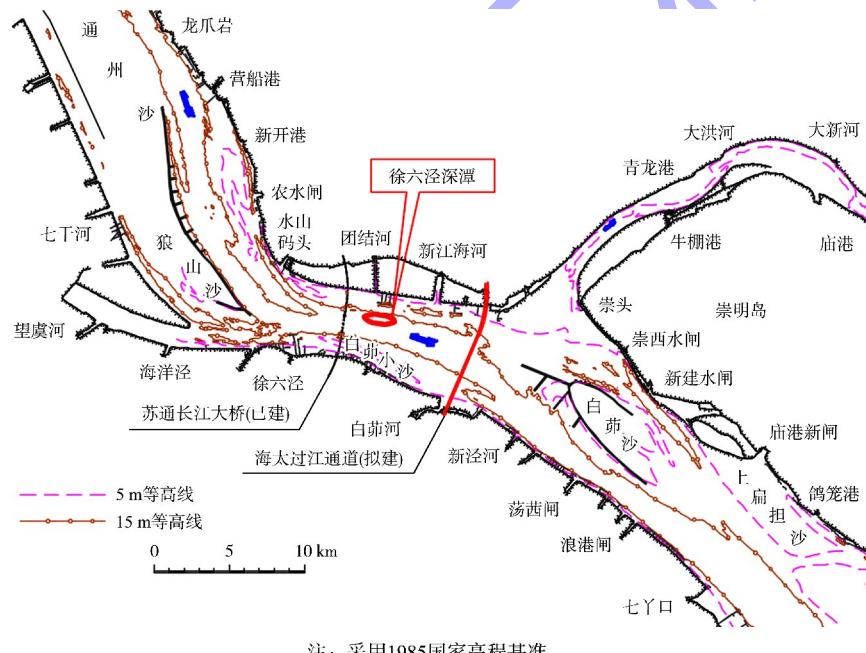


图 1 徐六泾河段河势

2 徐六泾河段河床演变概况

2.1 总体演变特征

经过多年的自然演变及人工治理，在天然及人工节点控制作用下，徐六泾及上下游河段滩槽格局总体稳定。

随着长江上游来沙量锐减，长江中下游河床整体呈现冲刷态势且向下游传递；大洪水是本河段河势变动的首要动力因素，现状工程河段总体

处于冲刷态势是长江中下游河床自然演变的延续。

近年来白茆沙河段南水道总体均处于冲刷发展中，但白茆沙汊道段“南强北弱”的河势格局仍有加剧的趋势。深水航道整治一期白茆沙工程的实施使得白茆沙沙头后退的趋势得以控制，有利于白茆沙分汊河段河势和南水道进口的航槽稳定^[7]。

2.2 边界变化

历史上长江主流曾顶冲常熟岸线，致使江岸

崩塌, 18世纪开始常熟岸线先后修建海塘及一系列桩石工程, 加上右岸地质条件较好, 徐六泾段右岸长期处于稳定状态。1954年通海沙围垦成陆, 1957年通海沙并左岸, 1958年开始左岸进行了一系列围垦工程(图2), 1965年江心洲农场成陆, 1973年江心沙并左岸, 江面由原来的15.7 km缩窄至5.7 km, 形成了徐六泾节点段。

1993—1999年在海门县海太汽渡附近进行了圩角沙围垦; 2007年常熟边滩围垦; 2008年新通海沙开始分期实施围垦; 2017、2018年苏通长江大桥上下游围堤工程实施后, 新通海沙围垦工程实施完成, 徐六泾节点段继续缩窄, 河宽最窄不足4.5 km, 节点段河势得到进一步控制, 上游变化对下游的影响进一步减小。

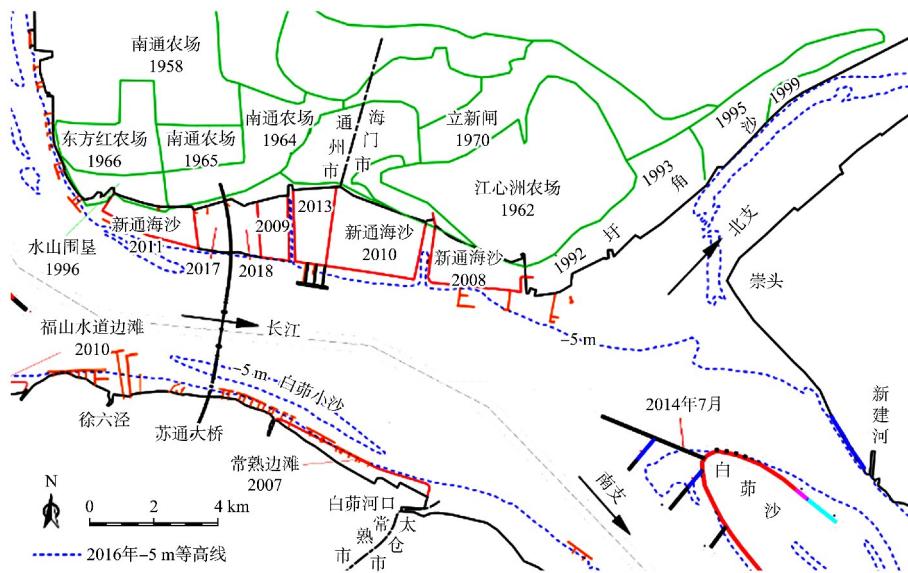
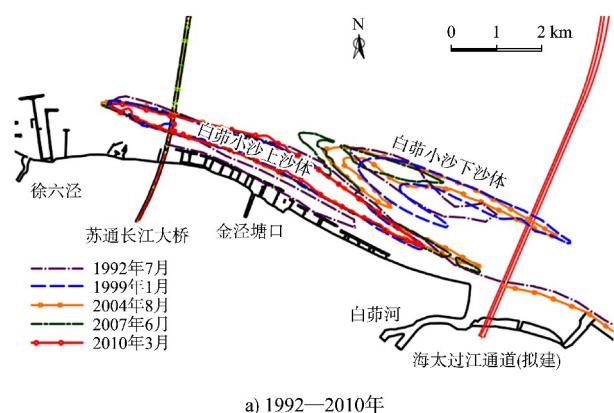


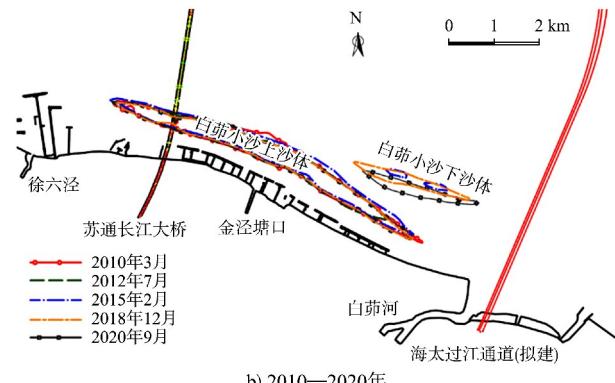
图2 徐六泾河段岸线变化

2.3 滩槽演变

徐六泾河段现有洲滩主要为白茆小沙。多年来白茆小沙上沙体变化较小, 下沙体在1999年后由于长江上游来沙量的减少、上下游河势变化以及周边围垦工程等影响冲刷逐年减小, 至2008年8月基本冲失。随着2014年白茆沙深水航道整治工程的实施, 下沙体逐渐恢复, 但仍未达到20世纪90年代较为完整的状态^[8], 见图3。



a) 1992—2010年

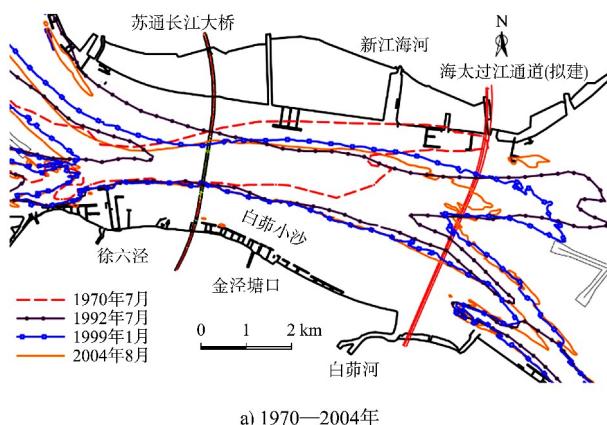


注: 高程系统采用1985国家高程基准。

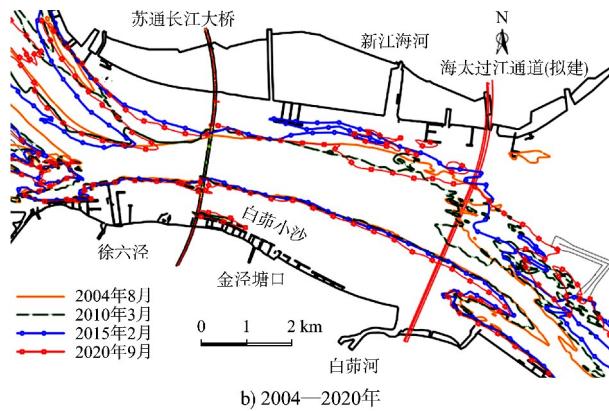
图3 白茆小沙 1992—2020年-5 m等高线变化

1992年以前, 徐六泾河段上段深槽基本稳定, 下段深槽逐步南偏; 此后, 上游狼山沙一直处于下移西偏的态势中, 1998、1999年大洪水后, 下移西偏的态势仍有所加剧, 这使得狼山沙东西水道的汇流点上提, 顶冲点移至徐六泾附近, 进口段深槽左侧明显淤积、右侧有所冲刷, 深槽总

体向南摆动；2004 年后，随着苏通长江大桥的建设以及上游狼山沙下移西偏的速度减缓，狼山沙东西水道的汇流顶冲点的上提速度也有所减缓，徐六泾附近深槽左侧淤积速度较 2004 年前有所减慢。近年来徐六泾河段 -15 m 等高线变化见图 4。



a) 1970—2004年



b) 2004—2020年

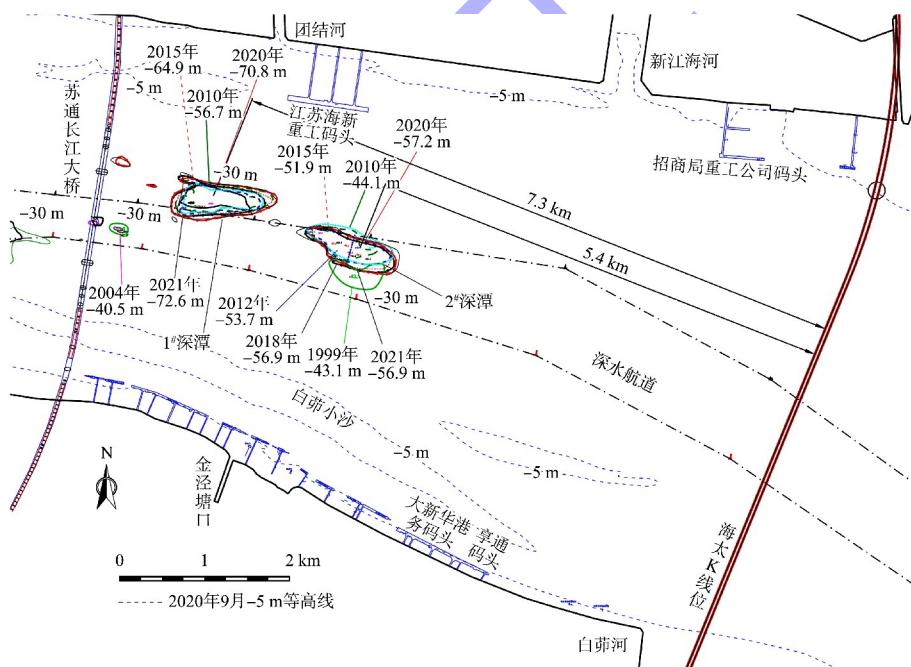
注：高程系统采用1985国家高程基准。

图 4 徐六泾河段 1970—2020 年 -15 m 等高线变化

3 徐六泾深潭变化

3.1 深潭深度变化

根据资料，自 1999 年，苏通长江大桥下游已存在 1~2 个 -40 m 以深的深潭。近年来徐六泾深潭 -40 m 等高线及最深点变化见图 5。



注：1985国家高程基准等高线，边界2020年9月测。

图 5 徐六泾深潭 -40 m 等高线及最深点变化

多年来 1#、2# 深潭最深点及其位置见表 1。2007 年以前，2# 深潭最深点高程一般在 -50.0 m 以上。2007 年后，由于苏通长江大桥建设、上游来沙减小、徐六泾进口段河势变化和左右两岸圈围工程等因素影响，2 个深潭均呈冲深的态势（图 6）。1# 深潭的最低点高程 2004 年前在 -40 m

左右，2012 年降至 -60 m 以下，2020 年降至 -70 m 以下。2# 深潭 2010 年前时有时无，冲淤变化大，2010 年后稳定出现，其最低点高程逐渐降低，但冲深幅度较 1# 深潭小，2011—2021 年最深点高程在 -57.2~ -51.9 m。

表1 苏通长江大桥下游-40 m深潭特征值

深潭	时间	最深点高程/m	大桥下游距离/km	-40 m等高线(长×宽)/(m×m)
	1999年1月	-40.5	0.3	230×150
	2004年8月	-37.0	2.7	-
	2007年9月	-51.1	1.2	790×260
	2010年3月	-56.7	1.3	1 140×374
	2011年11月	-52.1	1.1	920×390
1 [#]	2012年7月	-60.6	1.1	950×430
	2015年8月	-64.9	1.1	1 130×430
	2016年9月	-60.1	1.3	1 030×390
	2018年12月	-62.1	1.3	1 100×460
	2020年9月	-70.8	1.2	1 230×490
	2021年1月	-72.6	1.2	1 150×490
	1999年1月	-43.1	3.1	638×305
	2004年8月	-	-	-
	2007年9月	-	-	-
	2010年3月	-44.1	2.9	840×360
	2011年11月	-52.1	3.3	1 100×383
2 [#]	2012年7月	-53.7	3.1	1 060×320
	2015年8月	-51.9	3.0	1 018×360
	2016年9月	-50.1	2.8	1 416×329
	2018年12月	-56.9	3.0	1 119×332
	2020年9月	-57.2	2.8	1 129×332
	2021年1月	-56.9	2.9	1 257×368

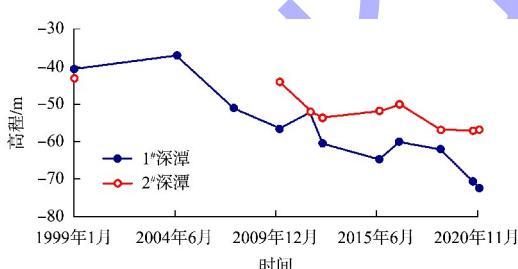


图6 徐六泾河段-40 m等高线最深点高程变化

3.2 深潭平面活动性变化

图7为近年来徐六泾深潭的位置变化。1[#]深潭最深点与苏通长江大桥的距离在1.1~1.3 km, -40 m深潭长度约1 100 m, 宽度约450 m; 2[#]深潭最深点与苏通长江大桥的距离约3.0 km左右, 长度约1 100 m, 宽度约350 m。在2010年两岸围垦工程开始实施后, 深潭平面大小没有明显变化, 最深点的位置也没有明显的趋势性变化。

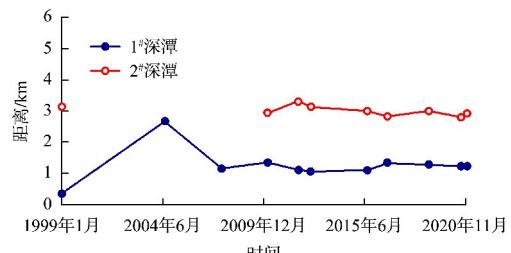


图7 深潭距苏通长江大桥距离变化

3.3 与下游深槽连通的可能性分析

1) 实测资料分析。为分析徐六泾河段和下游白茆沙南水道间深槽连通发展的可能性, 统计了近年来河段-30 m等高线深槽的距离, 见图8。由图可见, 多年来, 尽管上下游深槽有一定冲淤, 但在海太线位附近河道放宽段水流相对较弱, 河床冲淤相对较小, 1992年以来, 徐六泾、白茆沙河段-30 m槽距离基本稳定在10 km左右, 上下游-30 m深槽没有连通发展的趋势。最新的2021年7月测图显示, 两槽-30 m等高线的距离为10.4 km。

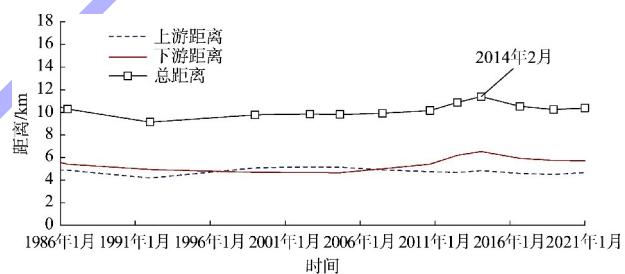


图8 徐六泾及白茆沙河段-30 m槽距离

2) 模型预测。规划边界条件下300 a一遇水文年的河床地形见图9。徐/六泾附近深槽靠右岸, 河床最低高程在-50 m以下, 苏通长江大桥下主槽中偏左, 金泾塘口附近主槽偏左出现-60 m槽及-50 m槽。金泾塘口下-20 m槽冲刷扩大并有所下延, 金泾塘口下-30 m槽冲刷扩大, -30 m槽尾部已下延至海太线位以下约500~1 000 m。海太线位最深点在-31.5 m左右。在白茆沙水道南强北弱的趋势下, 上游徐六泾河段深槽可能向南水道发展, 海太线位附近深槽居中偏南向下发展。两深潭平面位置总体稳定, 没有连通及向下游发展的趋势。

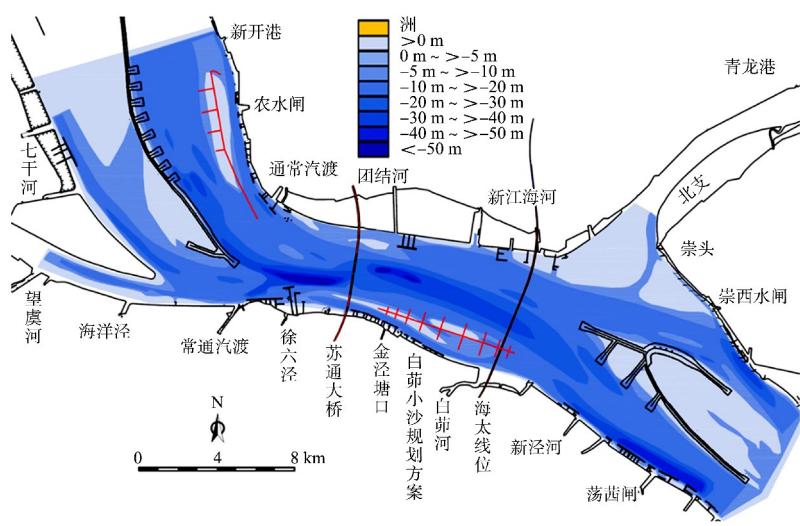


图 9 规划边界条件下 300 a 一遇水文年河床地形

3.4 深潭形成原因分析

1) 多汊水流汇流，水流紊动强烈，局部区域会出现深潭。工程区上游多汊汇流，水流紊动强烈，对河床局部产生明显淘刷从而出现深槽。长江河口段的一些区域在矶头、护岸丁坝、码头等特有的地形边界挑流作用下，局部水流紊动强烈，也会存在较大冲刷。2012 年前，上游狼山沙一直处于西偏下移的冲刷态势中，导致徐六泾河段进口段右侧水流的顶冲点上移，深槽右移，改变了水流条件，局部区域出现深潭。

2) 邻近工程的影响。桥梁工程实施后,由于桥

墩对水流的挤压作用，桥墩局部会产生较大的冲刷坑，桥位附近河床出现较大的冲刷^[9]。2003年前，苏通长江大桥下游深槽高程一般在-40 m以浅，仅1998、1999年大洪水后出现过-40 m以深深槽，在此后又淤浅消失；2004年测图显示深潭出现并有所冲深发展，除与2003年后上游来沙减少、河床总体冲刷有关外，与桥梁建设引起的冲刷存在一定的关系。

围垦工程的实施使得徐六泾节点段的控导作用增强，但缩窄了河道，水流有所集中，河床局部区域易出现冲刷。2007年后，深潭位置没有变化，但最深点有所增深。

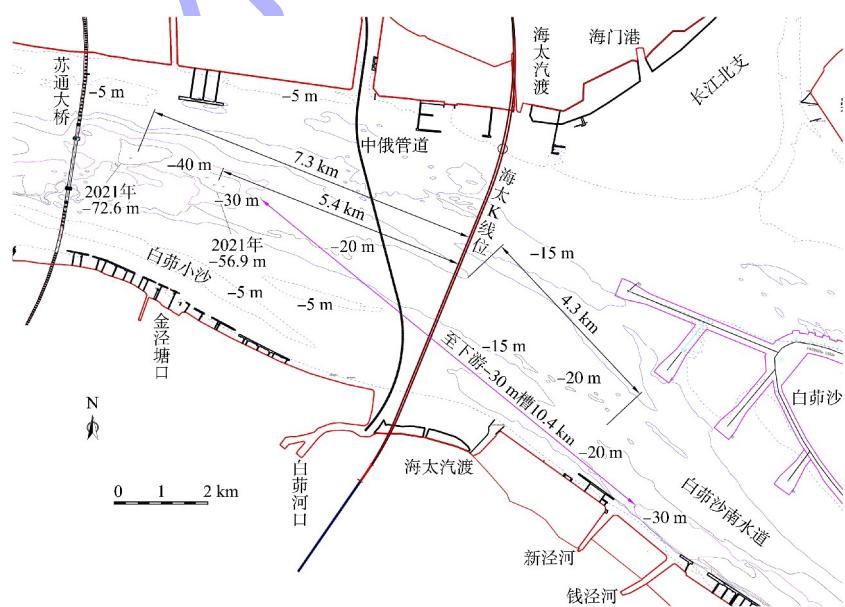


图 10 拟建海上隧道与人工湖洞挖位置

3) 黏土夹粉细砂的土层地质结构容易冲刷出现深潭。地质勘探资料表明, -50 m 以内土层主要由粉质黏土夹粉细砂、粉细砂黏性土以及粉细砂等组成, -120~ -50 m 间以粉细砂为主, 中间少部分为含砾中粗砂(图 11)。土层结构在上层如有一定抗冲性的粉质黏土冲刷, 则下层粉细砂易

冲刷从而形成深潭。

4) 上游来沙减小使得水流挟沙能力增强。2003 年后, 随上游三峡水库及梯级枢纽的建设和水土保持措施的实施, 长江上游来沙明显减少。据上游大通站资料, 三峡水库蓄水后, 来沙量较蓄水前减少 70%, 水流挟沙能力增强。

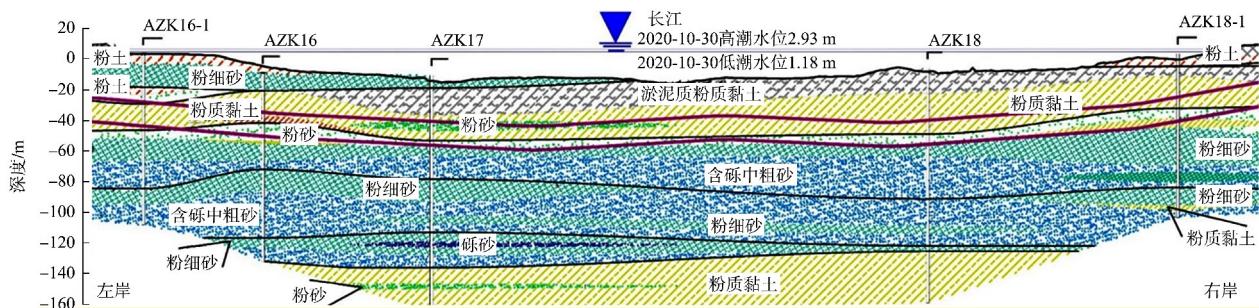


图 11 工程河段地质纵断面

4 深潭演变趋势及其对海太过江隧道布设的影响

4.1 深潭演变趋势分析

1) 近年来, 苏通长江大桥下游一般存在 2 个深潭, 1#深潭有所冲深发展。2003 年前, 深槽最低点一般在 -40 m 以内, 受苏通长江大桥等工程建设影响, 出现 -40 m 以下的深潭并发展。随上游来沙减少及两侧徐六泾节点整治工程实施, 深潭冲深发展; 2007 年后深潭最低点均在 -50 m 以下; 2020 年后, 最深点刷深至 -70 m 以下。

2) 深水航道整治工程实施前, 上游狼山沙西偏下移使得徐六泾河段进口段水流顶冲点上移、深泓南移, 苏通长江大桥与拟建海太隧道间深槽略有向北发展的趋势。2012 年深水航道整治工程实施后至今, 深槽的横向位置相对稳定。

3) 受 2003 年后上游来沙减小等因素影响, 河床总体处于冲刷态势。1#深潭平面位置及大小变化较小, 但近年来最深点缓慢增深; 2#深潭 -40 m 等高线为 1 100 m × 330 m(长 × 宽), 其大小和位置无明显变化。

4.2 深潭演变趋势对海太过江隧道布设的影响

拟建海太过江隧道位于苏通长江大桥下游约 8 km, 河宽 7.5 km, 2#深潭中心距离海太过江隧道约 5.3 km。

有研究表明, 桥梁工程对水动力和河床冲淤的影响范围一般在 5~6 km^[10]; 同时考虑徐六泾河段下段为展宽段, 水流减缓, 预计深潭冲刷下移可能性不大, 或缓慢下移后深潭也会有所淤浅; 多年来深潭的 -30 m 线与下游白茆沙南水道的 -30 m 线的距离基本稳定在 10 km 左右; 物理模型试验研究表明, 徐六泾深潭没有明显下移趋势^[11]。

因此, 徐六泾深潭的变化对下游 8 km 的海太过江隧道的布设不会造成明显影响, 但考虑深潭冲深发展, 需加强对深潭变化的监测。

5 结论

1) 受上游汊道汇流后水流紊乱、邻近工程建设等影响, 拟建海太过江通道上游 5.4 km 冲刷出现 -40 m 以深的深潭, 近年来深槽位置相对稳定但有所增深。

2) 结合模型预测, 考虑未来水沙条件变化因素, 徐六泾河段两处深潭没有向下游发展的趋势。因此, 拟建海太过江通道埋深可按河段河床的极限冲刷深度确定, 建议不考虑上游深潭深度影响。

3) 工程河段水沙条件复杂, 需加强对深潭变化的监测。

(下转第 77 页)