文章编号:1005-9865(2020)04-0081-10

径流量变化对长江口水动力特性的影响

范明源[1],李俊花[1],万远扬[2],郭 贺[1]

(1. 上海海事大学 海洋科学与工程学院,上海 201306; 2. 上海河口海岸科学研究中心 河口海岸交通行业重点实验室,上海 201201)

摘 要:为了研究径流量变化对长江口水动力特性的影响,利用 MIKE21 建立长江口水动力数学模型,分别模拟计算长江口不同径流量影响的潮流场,统计分析不同径流量时各汊道涨落潮量和净泄量以及分配比例;统计分析不同径流量对各汊道潮位变化的影响;统计分析不同径流量对北槽中下段水动力特性的影响。得到如下结论:1)径流量的变化对于涨潮分流的影响显著,随着径流量的增加,更多的潮流从北支、北港、南槽进入长江口内。当上游的径流动力增强,外海潮流受上游径流的阻挡,难以继续上溯。2)越是靠近上游,径流量的变化对平均潮位的影响程度越高,入海口处受径流的影响微弱;上游径流量越大,潮波向内陆传播越受阻,能量消耗越大,致使其动力减弱。3)径流量的变化对平均流速的影响与上述潮位变化类似,上游径流量越大,各汊道流速越大;越靠近海洋,径流影响越小。4)长江口北槽中下段转流时刻会出现平面对流现象。横向方向上普遍存在越堤水流,且南北导堤均为北向越堤流占优势。

关键词:长江口;水动力特性;径流量;涨落潮;平均流速;越堤水流

中图分类号:TV148; U617.6 **文献标志码**:A DOI:10.16483/j.issn.1005-9865.2020.04.010

Effect of runoff change on hydrodynamic characteristics of the Yangtze River estuary

FAN Mingyuan[1], LI Junhua[1], WAN Yuanyang[2], GUO He[1]

(1. College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Estuarine & Coastal Engineering, Ministry of Transport, Shanghai Estuarine and Coast Science Research Center, Shanghai 201201, China)

Abstract: A hydrodynamic mathematical model of the Yangtze River estuary is established by using the MIKE21 to study the effect of runoff change on hydrodynamic characteristics of the Yangtze River estuary. The tidal current fields of the Yangtze estuary with different runoffs are simulated. The amount of the flood current, ebb current and the net water leak with different runoffs is counted and analyzed. And the effect of runoff change on tidal level and hydrodynamic characteristics of the North Passage is analyzed. The results are as follows: 1) The change of runoff has a significant impact on the flood diversion. With the increase of the runoff, more and more tidal current flows into the Yangtze estuary from the North Branch, the North Channel and the South Passage. When the upstream runoff power increases, the tidal current is blocked by the upstream runoff, and it is difficult for it to continue upstream. 2) The closer it is to the upstream, the higher the impact of runoff change on the average tide level is, and the impact of runoff at the estuary is weak. The larger the upstream runoff is, the more blocked the tide wave propagating inland is, the more the energy consumes, resulting in the weakening of its power. 3) The effect of changes in runoff on average velocity is similar to that of the changes in tidal level described above. The greater the upstream runoff, the greater the velocity of each channel. 4) Plane circulation will occur at the turning time in the middle and lower part of the North Passage of the Yangtze River estuary. Levee crossing flow is common in the transverse direction and both north and south diversion dikes are dominated by the north levee crossing flow.

Keywords: the Yangtze estuary; hydrodynamic characteristics; runoff; ebb and flow; average velocity; overtopping flow

收稿日期:2019-12-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0405400);国家自然科学基金(51779135)

作者简介:范明源(1996-),男,上海金山人,硕士研究生,研究方向为港口、近岸与海洋工程水动力学。E-mail: 18721778952@163.com

长江河口出徐六泾以后,呈“三级分汊、四口入海”的格局[1]:崇明岛将长江河口分为南支和北支,南支又被长兴岛、横沙岛分为南港和北港,九段沙又将南港分为南槽和北槽(图 1),水动力过程受径流、潮流、波浪、风、沿岸流等多种因素共同作用,动力系统十分复杂。近年来,许多学者对长江口水动力特性进行了研究,包括涨落潮槽的水动力输运机制研究[2-3]、水沙特性[4]和河势变化规律[5-6]以及工程活动[7-8]等方面。刘高伟等[9]基于 2007 年长江口大潮实测流速资料,运用数据统计和机制分解法分析各河槽水沙输移特性,结果表明:枯季优势流小于洪季,枯季北支、南支北侧、北港中下段、南槽南边滩为涨潮优势,其他河槽为落潮优势,洪季北槽口外为涨潮优势,其他河槽为落潮优势。于凤香等[10]采用混合坐标系的方法建立一套适用于长江口潮流的三维水动力模型,统计分析完整潮周期内的计算结果,发现各汊道的涨落潮动力差异较大,北支在枯季大潮时期的落潮分流比小于 1%,南、北支上口的动力差异是盐水倒灌的诱因。杜亚南等[11]根据代表长江口水文要素观测的徐六泾站潮流量整编成果进行分析统计,得出结论:涨潮、落潮及净泄潮量年内分配不均,净泄潮量年内分配比相对更加集中;潮流量的变化过程与前述的净泄潮量的变化规律一致。这些研究对长江河口的水流泥沙输运规律、河床演变、航道整治等均有重要意义。只有充分认识不同径流量与潮流交互作用引发的河口水动力环境的变化规律,才能更系统更全面地了解长江口特性。同时,对河口航道维护,港口工程建设,水体环境保护,渔业资源开发乃至整个河口的综合开发治理具有重要的现实意义。

自 2003 年三峡大坝建成以来,长江径流和节律发生了较大变化[12](图 2)。张怡辉[13]应用 ECOMSED 模型模拟长江口潮流场,研究表明三峡蓄水对长江口水动力的影响不可忽略,致使落潮流速减小,涨潮流速增大。长江口属于中等潮差河口,平均潮差为 2.67 m,潮流界至江阴附近,潮区界可达安徽大通。根据 2004—2018 年大通站实测资料统计,大通站年平均径流量为 27 042 m^3/s,流量高峰出现在洪季 7—8 月,最大流量为 46 858 m^3/s,流量低谷出现在枯季 1—3 月,最小流量为 12 974 m^3/s。2016 年遭遇了长江流域大洪水,2016 年 7 月最大流量 71 000 m^3/s,其中全年大于 30 000 m^3/s 的天数为 151 天,大于 40 000 m^3/s 的天数为 133 天,大于 50 000 m^3/s 的天数为 64 天。2017 年 7 月最大流量 70 900 m^3/s,其中全年大于 30 000 m^3/s的天数为 174 天,大于 40 000 m^3/s 的天数为 47 天,大于 50 000 m^3/s 的天数为 29 天。2018 年径流量较多年平均值偏小,洪季期间最大流量仅 46 900 m^3/s,洪季过后流量回落至 20 000 m^3/s 左右[14]。三峡工程将15 000 m^3/s作为大通 10 月流量下限,一旦低于该阈值,长江口受盐水入侵的机会将大大增加[15]。长江口的潮汐一天内有两涨两落,一个半日潮周期时长 12.42 h,日潮不等现象显著,口外东部水域属于正规半日潮流区。随着潮流进入河口,水深变浅,浅水分潮增强,潮流逐渐成为非正规半日潮。

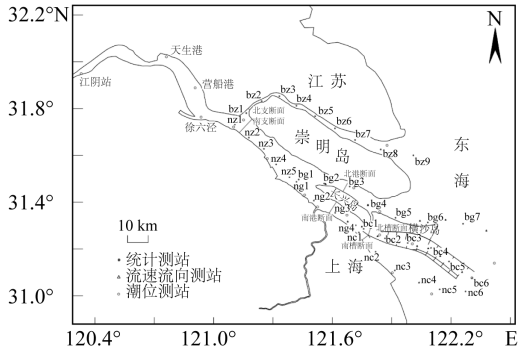


图 1 长江口测点布置示意

Fig. 1 Survey point layout of the Yangtze River estuary

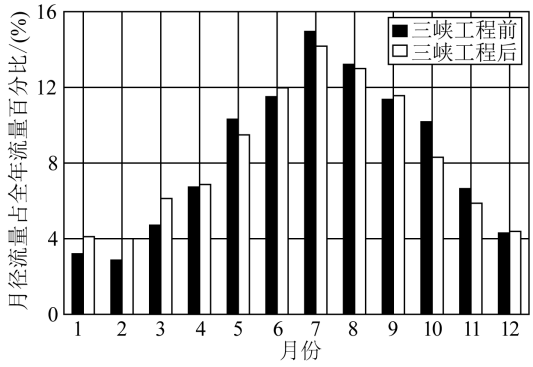


图 2 大通站流量统计

Fig. 2 Flow statistics of Datong station

1 研究方法

1.1 模型选用

水动力模拟区域包含长江下游感潮河段及整个河口区,河道与河口在横向尺度上存在很大的差异,并且区域水动力过程复杂,对模型适用性的要求较高。选用平面二维数学模型 MIKE21 进行长江口区域流场的数值模拟。该模型适用于模拟河流、湖泊、河口、海湾、海岸及海洋的水流、波浪、泥沙及环境[16]。

1.2　模型控制方程

该模型是基于三向不可压缩和雷诺数均布的 Navier-Stokes 方程[17],并服从于 Boussinesq 假定和静水压力假定。

二维非恒定浅水方程组:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{u}}{\partial x}+\frac{\partial h\bar{v}}{\partial y}=hS \tag{1}$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x}+\frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y}=h\bar{v}f-gh\frac{\partial \eta}{\partial x}-\frac{h}{\rho_0}\frac{\partial P_a}{\partial x}-\frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial x}+\frac{\tau_{sx}}{\rho_0}-\frac{\tau_{bx}}{\rho_0}+\frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx})+\frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy})+hu_sS \tag{2}$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x}+\frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y}=-h\bar{u}f-gh\frac{\partial \eta}{\partial y}-\frac{h}{\rho_0}\frac{\partial P_a}{\partial y}-\frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial y}+\frac{\tau_{sy}}{\rho_0}-\frac{\tau_{by}}{\rho_0}+\frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy})+\frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy})+hv_sS \tag{3}$$

式中:t 为时间;x,y 为笛卡尔坐标系坐标;η 为水位;d 为静止水深;$h=\eta+d$ 为总水深;u,v 分别为 x,y 方向上的速度分量;f 是科氏力系数,$f=2\omega\sin\varphi$,ω 为地球自转角速度,φ 为当地纬度;g 为重力加速度;ρ 为水的密度;S 为源项;(u_s,v_s) 为源项水流流速。

$\bar{u}$, $\bar{v}$ 为沿水深平均的流速,由以下公式定义:

$$h\bar{u}=\int_{-d}^{\eta}u\mathrm{d}z,\quad h\bar{v}=\int_{-d}^{\eta}v\mathrm{d}z \tag{4}$$

其中,T_{ij}为水平黏滞应力项,包括黏性力、紊流应力和水平对流,这些量是根据沿水深平均的速度梯度用涡流粘性方程得出的:

$$T_{xx}=2A\frac{\partial \bar{u}}{\partial x},\quad T_{xy}=A\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}+\frac{\partial \bar{v}}{\partial x}\right),\quad T_{yy}=2A\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \tag{5}$$

2　模型建立与验证

2.1　确定计算域

水动力模型包含范围较广,河道、河口和海区各区域水体空间尺度变化较大,为了尽可能在满足不同区域计算精度的同时保持较高的计算效率,对于重点研究区域进行网格加密。

模型范围选取在 117°43'E、124°20'E、29°24'N 和 33°30'N 之间,采用北京 54 坐标系、中央经线为 123 度的 6 度带投影。上游开边界选取在大通,给定流量过程;下游开边界选取在 124°20'E、29°24'N 和 33°30'N 的外海,给定水位过程,通过全球潮汐预测模型得出,若无特殊说明,文中高程系统均为上海城建吴淞高程基准面。网格共 61 835 个,节点共 32 137 个,外海网格节点最大距离 13 km,北槽最小网格节点距离 300 m。模型网格见图 3。计算时间为 2015 年 7 月 1 日零点至 2015 年 8 月 2 日零点,时间步长均为 120 s。

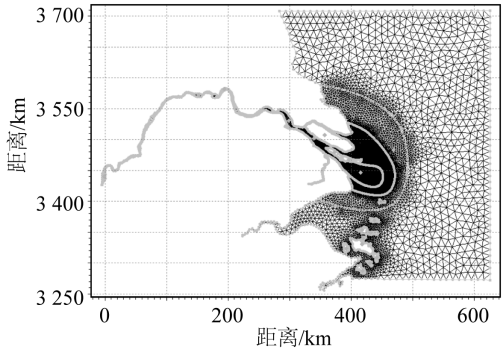


图 3　模型网格范围

Fig. 3　Model grid range

2.2　模型验证

根据 2015 年 7 月长江口水文站点的实测资料来对建立的数值模型进行验证,潮位验证共 19 个验证站点,分别为江阴站、天生港、营船港、徐六泾、白茆、崇明洲头、连兴港、杨林、六滧、共青圩、石洞口、吴淞、长兴

码头、横沙、北槽中、牛皮礁、鸡骨礁、中浚、南槽东。流速流向验证共 17 个验证站点,分别是 HS0、NGN4S、NG3、CS0S、CS9S、CS6S、CSWS、CS3S、CS4S、CS7S、CS10S、XQTD、BG4、BG5、BG2、BG6、BG3,验证测站分布见图 1。洪季北槽中站点的潮位验证图和 CS3S 的流速流向验证图,见图 4 和图 5。

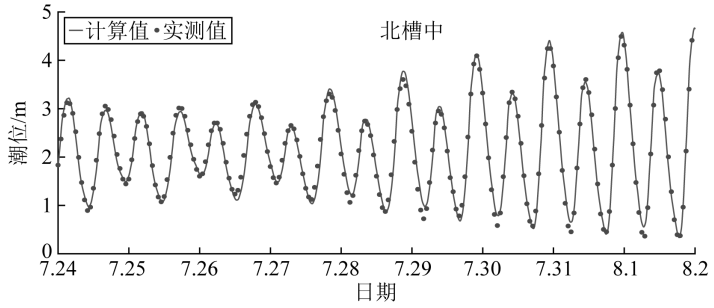


图 4 北槽中站洪季水位验证

Fig. 4 Verification of water level of the North Passage middle station in flood season

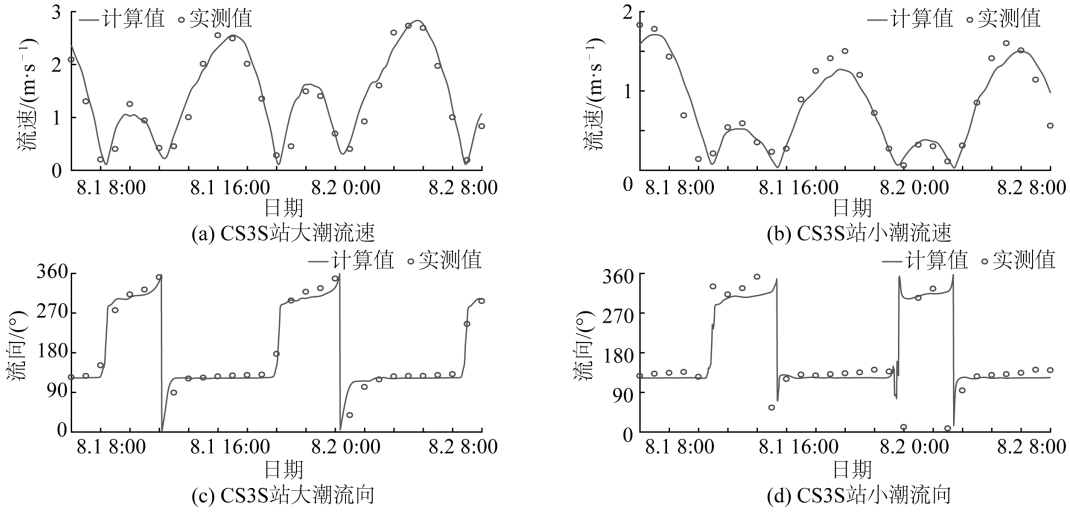


图 5 CS3S 测站洪季大小潮流速流向验证

Fig. 5 Verification of large and small tidal current velocities and direction of CS3S station in flood season

采用式(6)来计算所有验证点的相关系数值。

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{N}(me_i - \overline{me})(mo_i - \overline{mo})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(me_i - \overline{me})\sum_{i=1}^{N}(mo_i - \overline{mo})}} \tag{6}$$

式中:N 为样本数据总数;me_i、mo_i分别为第 i 个计算值、实测值;$\overline{me}$、$\overline{mo}$分别为计算值平均值、实测值平均值;ρ 为相关系数,ρ 值越接近 1,表示计算值越接近实测值,两者的相关性越好。表 1、表 2 分别为潮位验证站点和流速流向验证站点的相关系数值。

表 1 潮位验证站点的相关系数值

Tab. 1 Correlation coefficient values at tide level verification sites

站点	江阴站	天生港	营船港	徐六泾	白茆	崇明洲头	连兴港
ρ	0.947 9	0.968 1	0.981 7	0.973 5	0.949 5	0.974 9	0.964 2
站点	杨林	六滧	中浚	共青圩	石洞口	吴淞	长兴码头
ρ	0.980 0	0.972 3	0.988 8	0.976 6	0.967 8	0.978 5	0.985 8
站点	横沙	北槽中	牛皮礁	鸡骨礁	南槽东		
ρ	0.988 2	0.993 5	0.982 6	0.986 8	0.988 8		

表 2　流速流向验证站点的相关系数值

Tab. 2　Correlation coefficient values of velocity and flow verification station

站点	大潮		小潮	
	流速/(m·s^{-1})	流向/(°)	流速/(m·s^{-1})	流向/(°)
HS0	0.814 4	0.883 3	0.923 8	0.840 3
NGN4S	0.968 9	0.939 9	0.973 8	0.873 8
NG3	0.979 3	0.986 3	0.983 6	0.782 6
CS0S	0.963 4	0.835 1	0.985 4	0.875 6
CS9S	0.982 9	0.827 6	0.977 3	0.868 8
CS6S	0.954 6	0.882 8	0.987 2	0.851 2
CSWS	0.971 3	0.879 0	0.974 1	0.795 1
CS3S	0.966 1	0.982 5	0.941 1	0.881 2
CS4S	0.914 5	0.849 1	0.891 8	0.760 5
CS7S	0.872 6	0.974 4	0.987 6	0.959 2
CS10S	0.781 8	0.875 0	0.879 1	0.739 6
XQTD	0.790 4	0.742 7	—	—
BG4	0.825 8	0.862 8	—	—
BG5	0.972 0	0.840 7	—	—
BG2	0.963 3	0.813 0	—	—
BG6	0.941 9	0.984 6	—	—
BG3	0.926 1	0.995 5	—	—

验证过程中计算值与实测值之间存在一定误差,分析其主要原因为数值模型建立时主要考虑的动力因子为径流和潮流,而实测资料还受风、浪、温度、盐度等多种因素的影响。但总体来看,所建立的二维水动力模型能够反映出长江口水动力的基本特性,展现出长江口真实的流场状况,可以用于长江口水动力场的数值模拟。

3　结果分析

3.1　不同径流条件下水流特性变化与影响分析

大通站计算流量分别选用三峡水利枢纽工程规定的大通流量下限 15 000 m^3/s(代表枯季流量)、30 000 m^3/s(代表年平均流量)、年平均洪季流量 45 000 m^3/s(代表洪季流量)。统计不同径流量条件下长江口各汊道 15 天的净泄量和涨落潮量及其分配情况,统计断面布置见图 1,统计结果见图 6。

从不同径流量条件下长江口各汊道的涨落潮量和净泄量统计结果来看,径流量由 15 000 m^3/s、30 000 m^3/s、45 000 m^3/s 变化时,南支净泄量分配比例分别为 94.27%、95.45%、95.83%,南港净泄量分配比例分别为 59.16%、58.03%、57.53%,北槽净泄量分配比例分别为 97.13%、74.27%、66.21%;南支落潮分流比分别为 94.93%、95.07%、95.18%,南港落潮分流比分别为 54.57%、54.75%、54.88%,北槽落潮分流比分别为 47.13%、47.89%、48.45%;南支涨潮分流比分别为 95.37%、94.39%、92.90%,南港涨潮分流比分别为 52.88%、51.84%、50.67%,北槽涨潮分流比分别为 30.45%、27.55%、24.70%。随着径流量增加,净泄量分配比例:南支递增,南港递减,北槽递减;落潮分流比:南支递增,南港递增,北槽递增;涨潮分流比:南支递减、南港递减、北槽递减。

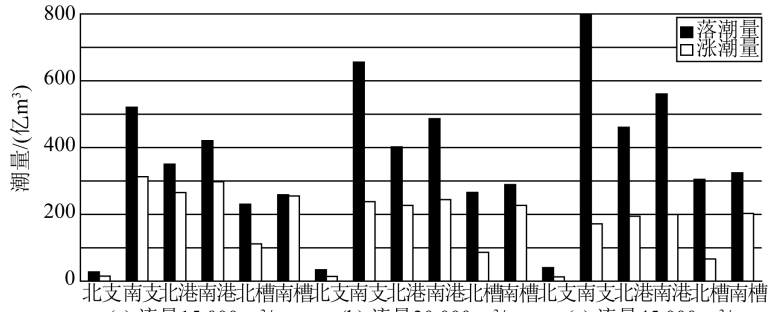


图 6 不同径流量条件下各汊道的涨落潮量

Fig. 6 Fluctuation tide of each branch under different runoff conditions

分析以上数据可知,由于长江口北支属喇叭状水道,分汊口处水道窄浅,浅滩遍布,且北支的主槽轴与上游河道偏转角较大,与南支分汊口处区别明显,随着径流量的增加,北支的上游来水分流作用逐渐减弱,上游来水主要流入南支,同时更多的落潮流从南支流出,而更多的涨潮流从北支流入;南北港的落潮分流效果几乎不受径流量的变化影响,变化幅度小于 1%,在不同径流量条件下始终保持着稳定的分流比,而随着径流量的增加,更多的涨潮流流入北港;南北槽的落潮比保持着相对稳定的分流比,变化幅度为 1%左右,但涨潮分流比变化较大,北槽从 15 000 流量的 30.45%减少到 45 000 流量的 24.70%;枯季时由于径流动力减弱,净泄量仅为 3.5 亿 m^3,南槽的涨潮量几乎持平落潮量,随着径流量的增大,落潮量逐渐增大,涨潮量逐渐减小,净泄量不断增大。综上所述,径流量的变化对于涨潮分流的影响显著,随着径流量的增加,更多的潮流从北支、北港、南槽进入长江口内。当上游的径流动力增强,外海潮流受上游径流的阻挡,难以继续上溯。

3.2 不同径流条件对潮位的影响分析

大通站计算流量分别选用 15 000 m^3/s(代表枯季流量)、30 000 m^3/s(代表年平均流量)、45 000 m^3/s(代表洪季流量)。统计 15 天不同径流量条件下的长江口各汊道内各站点的潮位变化情况,统计测站位置布置见图 1,统计结果见图 7。

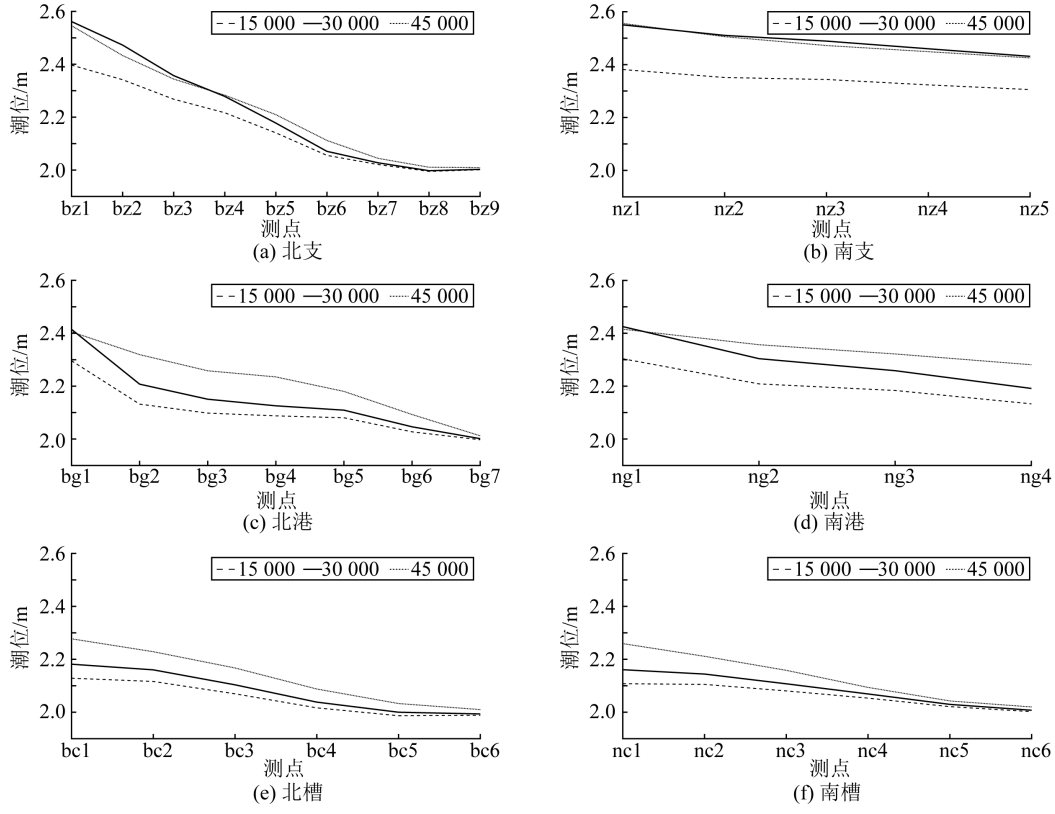


图 7 不同径流条件下各汊道的平均潮位变化

Fig. 7 The change of average tide level of each branch under different runoff conditions

从图 7 可以看出,不同径流量下各汊道的沿程水位变化有一定的相似性,长江口各汊道的平均潮位随径流量的增大均有一定程度的升高,上游径流量越大,平均潮位也越高;各汊道沿程各点平均潮位向海逐渐降低,径流量对平均潮位的影响也逐渐减小;对于同一条汊道,不同径流量对平均潮位的影响程度有所不同,越是靠近上游,平均潮位的变幅越大,说明径流量的变化对平均潮位的影响程度越高;入海口处测点的变幅均小于 1%,说明该位置受径流的影响微弱,潮位变化是要是受外海潮汐动力的影响。由此说明,上游径流量越大,潮波向内陆传播越受阻,能量消耗越大,致使其动力减弱。

3.3　不同径流条件对流速的影响分析

大通站计算流量分别选用 15 000 m^3/s(代表枯季流量)、30 000 m^3/s(代表年平均流量)、45 000 m^3/s(代表洪季流量)。统计 15 天不同径流量条件下的长江口各汊道内各站点的流速变化情况,统计测站位置布置见图 1,统计结果见表 3。

表 3　相对枯季流量各汊道沿程流速相对变化值

Tab. 3　Relative change of flow velocity along each channel in relative dry season

汊道	径流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	沿程各站点流速相对变化值/($m \cdot s^{-1}$)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
北支	30 000	0.020 5	0.037 8	0.017 7	0.013 7	0.009 8	0.004 1	0.001 3	0.000 9	0.001 0
	45 000	0.038 9	0.074 3	0.037 9	0.032 1	0.022 9	0.010 3	0.002 9	0.001 4	0.001 4
南支	30 000	0.072 3	0.053 1	0.059 7	0.034 0	0.041 2	—	—	—	—
	45 000	0.168 5	0.121 7	0.139 8	0.084 6	0.106 0	—	—	—	—
北港	30 000	0.029 6	0.049 2	0.023 3	0.018 6	0.006 6	0.013 8	0.003 9	—	—
	45 000	0.076 9	0.114 7	0.069 3	0.051 2	0.018 9	0.028 3	0.005 7	—	—
南港	30 000	0.034 1	0.035 9	0.023 5	0.015 1	—	—	—	—	—
	45 000	0.091 0	0.103 5	0.072 6	0.057 1	—	—	—	—	—
北槽	30 000	0.028 8	0.013 9	0.009 3	0.014 2	0.007 9	0.002 4	—	—	—
	45 000	0.079 1	0.042 9	0.029 4	0.033 4	0.016 8	0.002 8	—	—	—
南槽	30 000	0.001 3	0.001 2	0.007 7	−0.000 1	0.002 7	−0.002 3	—	—	—
	45 000	0.022 4	0.017 3	0.023 5	0.001 5	0.005 1	−0.004 9	—	—	—

从表 3 可以看出,不同径流量下各汊道的沿程速度变化有一定的相似性,长江口各汊道的平均流速随径流量的增大均有一定程度的增大,上游径流量越大,平均流速也越大;各汊道沿程总体趋势各点流速向海逐渐减小,径流量对平均流速的影响也逐渐减小;对于同一条汊道,不同径流量对平均流速的影响程度有所不同,越是靠近上游,平均流速的变幅越大,说明径流量的变化对平均流速的影响程度越高;入海口处测点的流速受径流的影响微弱,主要是受外海潮汐动力的影响。总体来看,流速变化和潮位变化规律类似。

3.4　长江口北槽中下段水流特性

长江口北槽河道位于长江口南港下段,九段沙、横沙岛及横沙东滩之间,河道全长约 60 km,自 1998 年长江口深水航道治理工程实施以来,北槽更是得到了较为全面的人工控制,当前北槽河道两侧有整治建筑物(南北导堤及丁坝合计共 169 km),中间为宽 350~400 m、深 12.5 m 的深水航道[18]。经过一至三期工程的艰苦建设,北槽形成了上下贯通、平面呈现微弯、覆盖航槽的深槽。深水航道概况图见图 8。

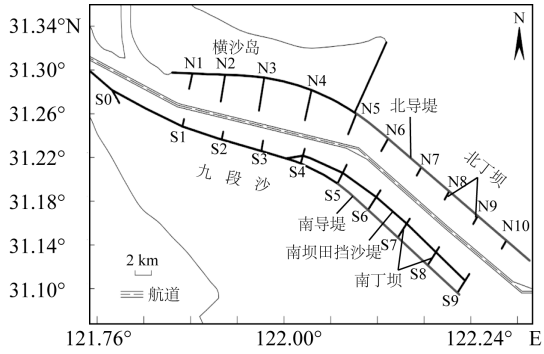
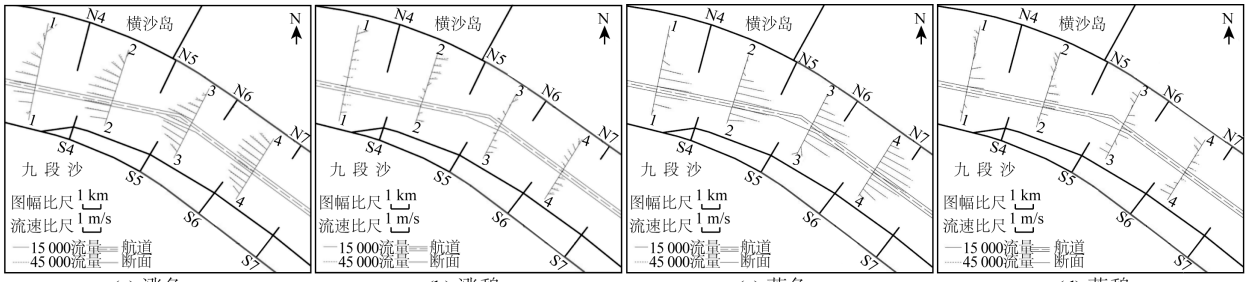


图 8 长江口深水航道概况图

Fig. 8 Profile of Deepwater Channel

1) 水流流速大小平面分布

利用前文中所建立的长江口二维模型分别计算大通站 15 000 m^3/s(代表枯季流量)及 45 000 m^3/s(代表洪季流量),统计洪枯季 15 天的长江口北槽径潮流情况,统计结果见图 9。



(a) 涨急 (b) 涨憩 (c) 落急 (d) 落憩

图 9 北槽中下段各断面瞬时垂线平均流速流向分布

Fig. 9 Distribution of instantaneous vertical average velocity and flow direction of each section of the North Passage

由图 9 可见:两条线的重合度非常高,说明洪枯季的情况非常相似,径流量的变化只会稍微改变流速的大小和方向。涨潮时边滩先涨,随后才是主槽涨潮;落潮时也是边滩先落,随后才是主槽落潮;涨急落急时,主槽的流速显著大于边滩的流速,而涨憩落憩时,主槽的流速小于边滩的流速。在转弯段,由于水流受到惯性作用,水流会保持原来的运动状态继续向前,水流流向便会与航道主槽方向之间存在夹角,水流流向在弯道处均会向北偏折。在转流时刻,会出现主航道两侧的水流运动状态不同的情况(如图 9 的(b)、(d)),航道南侧已经开始落潮,而航道北侧还在涨潮,这种两边完全相反的运动状态会在平面上形成对流。对比流量 15 000 m^3/s和 45 000 m^3/s 的情况,越靠近上游,径流动力越强,而越靠近下游则潮流动力越强,上游径流量越大,潮波向内陆传播越受阻,能量消耗越大,致使其动力减弱。

2) 横向越堤水流

长江口深水航道的南北导堤的主要作用是导流、挡沙以及减淤,南北导堤堤顶高程均为 2 m,南坝田挡沙堤堤顶高程为 3.5 m。据长江口北槽实测资料统计,北槽中的涨潮流高程能达到 3~4 m,因此会存在越堤流。随着横沙岛东部浅滩促淤的完成,潜堤 N5 以西的北导堤已经不过水,但是潜堤 N5 以东段以及南导堤的越堤现象依旧普遍存在。利用前文中所建立的长江口二维模型分别计算大通站 15 000 m^3/s(代表枯季流量)及 45 000 m^3/s(代表洪季流量),统计洪枯季 15 天的长江口北导堤 N5 以下所有堤段及南导堤 S5 以下所有堤段的越堤情况,统计结果见表 4。

从表 4 中可以看出,北向越堤量大于南向越堤量,北向越堤流占优势,即大量潮流越过南导堤流入北槽,越过北导堤流出北槽。对比相同径流量下南北导堤的越堤净通量,越堤流出北槽的总水量大于越堤流入北槽的总水量,这是由于南坝田挡沙堤的堤顶高程为 3.5 m,挡住了大部分的南导堤越堤流,而北导堤的堤顶高程为 2 m,只能挡住部分越堤流。对比洪枯季的南北导堤越堤净通量发现,洪季越堤净通量有所增加。对比图 6 洪枯季北槽涨落潮量,北槽中的横向水流在量级上已经不亚于纵向水流,给拐弯段提供了大量的横向水流。

表 4　长江口北槽南北导堤越堤流量统计

Tab. 4　Flow statistics of the north-south dike over the North Passage of the Yangtze River estuary

径流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	导堤	北向越堤量/亿 m^3	南向越堤量/亿 m^3	净通量/亿 m^3
15 000	北导堤	134.0	57.4	76.6
	南导堤	48.4	26.4	21.9
45 000	北导堤	283.0	112.0	171.0
	南导堤	97.6	53.8	43.8

4　结　语

利用 MIKE21 建立长江口水动力数学模型,研究径流量变化对长江口水动力特性的影响。分析了不同径流量条件下各汊道涨落潮量和净泄量以及分配比例;分析了不同径流量对各汊道潮位变化的影响;分析了不同径流量对北槽中下段水动力特性的影响,得到如下结论:

1) 径流量的变化对于涨潮分流的影响显著,随着径流量的增加,更多的潮流从北支、北港、南槽进入长江口内。当上游的径流动力增强,外海潮流受上游径流的阻挡,难以继续上溯。

2) 越是靠近上游,径流量的变化对平均潮位的影响程度越高, 入海口处受径流的影响微弱;上游径流量越大,潮波向内陆传播越受阻,能量消耗越大,致使其动力减弱。

3) 径流量的变化对平均流速的影响与上述潮位变化类似,上游径流量越大,各汊道流速越大;越靠近海洋,径流影响越小。

4) 长江口北槽中下段转流时刻会出现平面对流现象。横向方向上普遍存在越堤水流,且南北导堤均为北向越堤流占优势。横向水流在量级上已经不亚于纵向水流,给拐弯段提供了大量的横向水流来源。

文中所建立模型仅考虑了长江口的径潮流变化情况,并未考虑风、浪、温度、盐度等其他因素的影响,模拟结果具有一定局限性,之后将继续开展后续研究并考虑更多影响因素来提高模型的准确性。

参考文献:

[1] 苏俐珊, 徐海珏, 白玉川. 长江口水动力特征的洪枯季差异分析[J]. 港工技术, 2018, 55(5): 1-6. (SU Lishan, XU Haijue, BAI Yuchuan. A variance analysis on hydrodynamic characteristics of the Yangtze River Estuary during flood and dry seasons[J]. Port Engineering Technology, 2018, 55(5): 1-6.(in Chinese))

[2] 唐玉杰, 王永红, 吴加学, 等. 长江口涨落潮槽水动力特性的同步观测及其输运机制研究[J]. 海洋地质动态, 2008, 24(5): 26-30. (TANG Yujie, WANG Yonghong, WU Jiaxue, et al. Synchronous observation and transport mechanism of the hydrodynamic characteristics of the ebb and flow channel in the Yangtze River Estuary[J]. Marine Geology Letters, 2008, 24(5): 26-30. (in Chinese))

[3] 蒋杰, 何青, 朱磊, 等. 长江口浑浊带核心区北槽水动力特征研究[J]. 海洋学报, 2019,41(1): 12-20. (JIANG Jie, HE Qing, ZHU Lei, et al. Analysis of hydrodynamic features of the North Passage in the turbidity maximum,Changjiang Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(1): 11-20. (in Chinese))

[4] 张俊勇, 吴华林, 赵德招. 潮汐河口宽浅弯道的水流动力特性分析[J]. 水运工程, 2013, (11): 119-123. (ZHANG Junyong, WU Hualin, ZHAO Dezhao. Flow dynamics characteristics of wide-shallow tidal estuary meandering river[J]. Port & Waterway Engineering, 2013, (11): 119-123. (in Chinese))

[5] 吴帅虎, 程和琴, 胥毅军, 等. 长江河口主槽地貌形态观测与分析[J]. 海洋工程, 2016, 34(6): 65-73. (WU Shuaihu, CHENG Heqin, XU Yijun, et al. Observation and analysis of bedform morphology of the Yangtze River estuary[J]. The Ocean Engineering, 2016, 34(6): 65-73. (in Chinese))

[6] 吴焱. 长江口南北港分流口河段近期河势变化及对区域重大整治工程的影响[J]. 水运工程, 2017(7): 136-140. (WU Yan. Evolution of ditributary reach of South and North Channels in the Yangtze Estuary and influence on surrounding regulation projects[J]. Port & Waterway Engineering, 2017(7): 136-140. (in Chinese))

[7] 孔令双, 戚定满, 顾峰峰. 长江口水动力特性变化的数值模拟分析[J]. 水运工程, 2013(11): 147-152. (KONG Lingshuang, QI Dingman, GU Fengfeng. Numerical simulation analysis for hydrodynamic characteristics change of the Yangtze

Estuary[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(11): 147-152. (in Chinese))

[8] 孙鹏, 陈海英, 周益人, 等. 长江口横沙东滩典型海堤越浪量现场和试验研究[J]. 海洋工程, 2019, 37(4): 27-34. (SUN Peng, CHEN Haiying, ZHOU Yiren, et al. Field and experiment studies on wave overtopping of typical dikes in Changjiang estuary in China[J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(4): 27-34. (in Chinese))

[9] 刘高伟, 程和琴, 李九发. 长江河口河槽水沙特性及其输移机制研究[J]. 泥沙研究, 2015(4): 44-51. (LIU Gaowei, CHENG Heqin, LI Jiufa. Transport mechanism and characteristics of water and suspended sediment in channels of the Changjiang Estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2015(4): 44-51. (in Chinese))

[10] 于凤香, 宋志尧, 李瑞杰. 长江口三维潮流数值计算及动力分析[J]. 海洋湖沼通报, 2003(3): 14-23. (YU Fengxiang, SONG Zhiyao, LI Ruijie. A 3-D hydrodynamical model for tidal current field of the Yangtze River Estuary[J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 2003(3): 14-23. (in Chinese))

[11] 杜亚南, 朱巧云, 吕志钢. 长江口历年入海水量月年变化特征分析[J]. 水利水电快报, 2019, 40(10): 8-29. (DU Yanan, ZHU Qiaoyun, LV Zhigang. Analysis of monthly and annual variations of seawater intakes over the Yangtze River Estuary [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2019, 40(10): 8-29. (in Chinese))

[12] 周建军, 张曼. 近年长江中下游径流节律变化、效应与修复对策[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1471-1488. (ZHOU Jianjun, ZHANG Man. Effect of dams on the regime of the mid-lower Yangtze River runoff and countermeasures[J]. Lake Science, 2018, 30(6): 1471-1488. (in Chinese))

[13] 张怡辉. 三峡工程对长江口水动力及污水输运的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2011. (ZHANG Yihui. Hydrodynamics and waste water transportation of Yangtze River Estuary affected by Three Gorges Project[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese))

[14] 李有为, 胡润东, 游强强. 三峡水库 175 m 蓄水后长江江阴站水位及潮波特性分析[J]. 中国水运·航道科技, 2019(4): 1-9. (LI Youwei, HU Rundong, YOU Qiangqiang. Analysis of water level and tidal wave characteristics of Jiangyin station of the Yangtze River after 175 m impoundment of the Three Gorges Reservoir[J]. China Water Transportation (Science & Technology for Waterway), 2019(4): 1-9. (in Chinese))

[15] 周建军, 张曼. 长江鄱阳湖问题的原因及湖口建闸的影响[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 1-12. (ZHOU Jianjun, ZHANG Man. Eco-problem of Poyang Lake in Yangtze River and effect of sluice gate construction at lake's outlet[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 1-12. (in Chinese))

[16] 许婷. MIKE21_HD 计算原理及应用实例[J]. 港工技术, 2010, 47(5): 1-5. (XU Ting. Calculation principle and application example of a two-dimensional flow model-MIKE21 HD[J]. Port Engineering Technology, 2010, 47(5): 1-5. (in Chinese))

[17] Mike21 & Mike3 flow model FM hydrodynamic and transport module scientific documentation[M]. Denmark: DHI Water & Environment, 2007.

[18] 杨丽. 径流量变化对长江口水动力特性的影响研究[C]. 上海: 上海海事大学, 2018. (YANG Li. Effect of runoff change on hydrodynamic characteristics of Yangtze River Estuary[D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2018. (in Chinese))