

长江口北支咸潮倒灌控制工程水动力数值模拟

吴继伟, 刘新成, 潘丽红

(上海市水务工程设计研究院有限公司, 上海 200063)

摘要:运用水流数学模型对长江口北支咸潮倒灌控制工程方案进行模拟, 分析了 3 个控制工程方案实施后的效果及对周边区域的影响。结果表明, 综合咸潮倒灌的控制效果、防洪排涝影响及对南支的影响等, 中束窄方案为本研究的推荐方案。

关键词:长江口; 咸潮倒灌; 控制工程; 数值模拟

中图分类号:TV853 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7647(2006)04-0043-03

Hydrodynamic simulation of control project on saltwater intrusion from north branch of Yangtze River Estuary//WU Ji-wei, LIU Xin-cheng, PAN Li-hong/*Shanghai Water Engineering Design and Research Inc., Shanghai 200063, China*

Abstract: The schemes for the control project on saltwater instruction were simulated by use of the hydraulic model, and the effects of three schemes implemented in the control project and their impacts on surrounding regions were analyzed. By comprehensive analysis of the control effects on saltwater intrusion and their impacts on flood control and drainage as well as influence on the south branch of the Yangtze River Estuary, the mediate narrowing scheme was recommended.

Key words: Yangtze River Estuary; saltwater intrusion; control project; numerical simulation

长江口北支是长江口三级分汊四口入海的一级汉道, 西起崇头, 东至入海口连兴港, 全长约 83 km, 北支上段弯曲, 湾顶在大洪港和大新河之间, 下段呈喇叭状。中下段河槽宽浅, 江中暗沙较多, 受河口涨落潮动力条件、上游河道演变和人类活动的影响, 自 20 世纪 50 年代末起, 北支由落潮槽演变为涨潮槽。近几十年来, 河道呈淤积萎缩趋势, 河槽日益淤浅, 容积不断减小, 大量水、沙、盐倒灌南支, 造成南支水质变咸和河势不稳定^[1]。因此, 有必要采取工程措施来控制北支咸潮倒灌, 消除或减轻对长江口淡水资源开发利用的不良影响, 以提高上海市对长江口淡水资源开发利用的能力^[2-3]。

本文应用美国陆军工程兵团编制的数学模型软件 SMS8.0, 针对北支下段不同束窄程度的大、中、小 3 个控制工程方案进行模拟计算, 分析不同工程方案实施前后潮量、流速及潮位等变化, 比较不同方案的实施效果, 为长江口北支整治提供科学依据。

1 数学模型

1.1 基本方程组

二维水流数学模型采用的基本方程是沿深度积分的平面二维质量与动量守恒方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{g \omega n^2}{h^{\frac{1}{3}}} (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} - 2h \omega v \sin \varphi = 0 \quad (2)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{g \omega n^2}{h^{\frac{1}{3}}} (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} + 2h \omega u \sin \varphi = 0 \quad (3)$$

式中: h 为水深; u, v 为直角坐标系下的速度; x, y, t 为直角坐标及时间; ρ 为水的密度; E 为涡动黏滞系数; g 为重力加速度; a 为底部高程; n 为曼宁糙率系数; ω 为地球角速度; φ 为纬度。

1.2 数值解法

上述方程组采用伽辽金加权余量有限元法进行数值求解。单元的形式可为一维线性单元、二维四边形或三角形单元, 适用于岸线曲折的边界。速度形函数为二次, 深度形函数为线形。空间积分采用高斯积分, 时间离散利用非线性有限差分。在每一时间步上, 变量表达式为

$f(t) = f(0) + at + btc \quad (t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t) \quad (4)$
 式中: a, b, c 是常数, $c = 1.5$ 。方程采用全隐式求解, 解法为 Newton-Raphson 非线性迭代。

1.3 模型的建立

本模型的计算范围上边界取至长江下游的江阴, 下边界取至东经 123°, 北边界取至吕四港附近(北纬 32°15'), 南边界取至芦潮港附近(北纬 30°53')。计算网格采用六节点二次三角形单元和八节点二次四边形单元相结合, 空间步长 100 ~ 3 000 m, 时间步长取 15 min。模型采用 1998 ~ 2002 年长江口实测水下地形资料。

模型中较为重要的参数曼宁系数和涡动黏滞系数由以下形式给出。

a. 曼宁系数。模型中曼宁系数 n 考虑有、无植被影响, 根据各单元的平均水深按公式(5)自动赋值并实时调整。

$$n = \frac{n_0}{h^\gamma} + n' e^{-\frac{h}{h_0}} \quad (5)$$

式中: h 为单元的平均水深; n_0 为无植被区最大的曼宁系数; n' 为有植被区的曼宁系数; h_0 为植被影响糙率的水域水深; γ 为深度系数。 n 取值范围为 0.010 ~ 0.018。

b. 涡动黏滞系数。模型中涡动黏滞系数 E 根据各单元的平均速度和水流方向上单元长度自动赋值并实时调整, 计算公式为

$$E = \frac{\rho_1 u dx}{P} \quad (6)$$

式中: P 为 Peclet 常数; ρ_1 为液体密度; u 为单元平均速度; dx 为主流方向的单元长度。

1.4 模型的率定和验证

本次计算模型的验证采用 2002 年 9 月洪季大潮的同步实测水文资料进行率定, 采用 2002 年 3 月枯季的水文资料进行验证计算。率定和验证的结果表明, 模型所采用的计算参数合理, 结果合理、可靠, 可以较真实地反映长江口地区的流场特性, 可以模拟控制工程方案。

2 工程方案及影响分析

2.1 工程方案

根据长江口综合整治研究规划, 本文模拟了北支束窄控制工程方案, 有大、中、小 3 个方案, 如图 1 所示。大束窄方案: 封堵新村沙右汊, 北支下段沿新隆沙暗沙群 - 2 m 线圈围, 圈围崇明东滩, 适当圈围连兴港下游滩地, 口门宽度由 11 km 缩窄为 5.5 km; 中束窄方案: 不封堵新村沙右汊, 北支下段沿省市边界线适当后退圈围, 不圈围崇明东滩, 适当圈围连兴

港下游滩地, 口门宽度缩窄为 6 km; 小束窄方案: 封堵新村沙右汊, 北支下段沿新隆沙暗沙群 - 2 m 线圈围, 圈围崇明东滩, 适当圈围连兴港下游滩地, 口门宽度缩窄为 9.2 km。

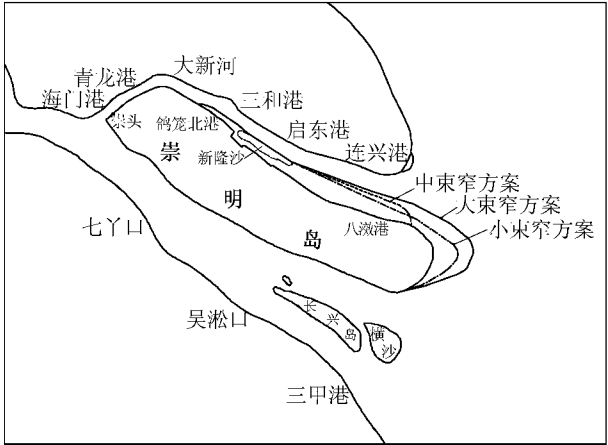


图 1 北支咸潮控制工程方案示意图

2.2 计算水文条件

上游江阴边界选用 2002 年 3 月枯季和 9 月洪季的实测水位过程, 外海边界采用同期预报潮位过程。

2.3 各工程方案比较及影响分析

2.3.1 对减轻咸潮倒灌南支的影响

北支是涨潮流占优的河道, 造成北支咸潮倒灌南支一般有两个主要因素: 一是上游来流量小, 二是北支中下段呈喇叭口状, 易形成涌潮且潮差较大。北支整治束窄方案的直接目的就是减小河道放宽率, 控制进潮量, 以达到减小潮差、减轻咸潮倒灌南支的目的。本文统计了北支进口断面连兴港断面的洪枯季涨潮量, 大、中、小束窄方案在连兴港断面洪季涨潮量分别减少了 37.3%, 30.7% 和 27.8%; 枯季分别减小了 36%, 29% 和 26.1%。可见, 束窄方案较大幅度地减少了北支涨潮量, 可以从潮量上控制北支咸潮倒灌南支。

束窄方案在减少外海咸潮来量的同时, 北支的涨潮流动力作用也有所减弱, 这可从崇头断面涨潮量和南北支会潮点的下移清晰地反映出。崇头断面统计显示, 枯季大、中、小束窄方案涨潮量分别减小了 41.4%, 40.8% 和 32.5%。沿北支上段取一纵剖面(图 2), 绘出沿程剖面的流速分布, 见图 3, 图 3 中

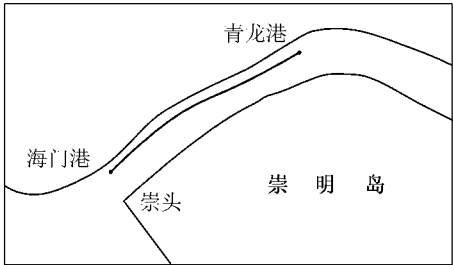


图 2 北支上段计算纵剖面线

流速值趋于零的点为不同工况下纵剖面流速分布曲线的极值点,即为南北支会潮点。由图 3 可见,小束窄方案会潮点下移约 500 m,大、中束窄方案下移距离接近,约 1000m,南北支会潮点的下移对减轻盐水倒灌也会产生积极的作用。

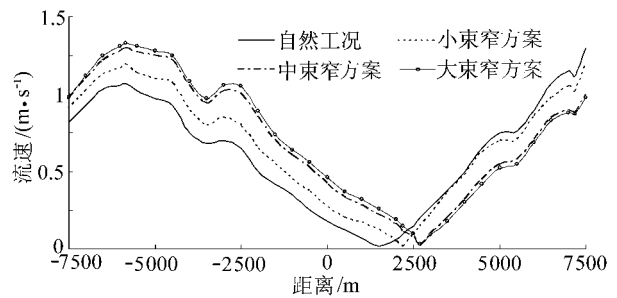


图 3 不同工况下南北支会潮点变化

2.3.2 对防洪排涝的影响分析

为比较实施束窄工程后北支潮流及流场的变化,在北支沿程河段取点进行比较,取点位置如图 4 所示。结果表明,束窄后由于北支河宽变窄,由口外传入的潮波受到的横向阻力增大,潮波能量损失也增大,潮差将减小,因而高潮位从北支上段至下段大部分都降低。大、中束窄方案实施后的高潮位降低 0.09~0.39 m,小束窄方案实施后一般降低 0.05~0.38 m,大、中束窄方案实施后的高潮位比小束窄方案实施后的高潮位还要低,高潮位降低最多的区域在北支上段。北支束窄后,高潮位降低,对两岸防洪防潮有利。

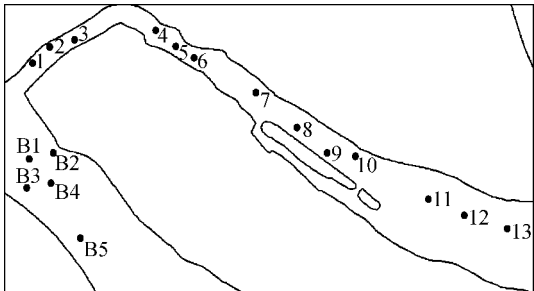


图 4 流速控制点位置示意图

北支实施大、中、小束窄工程后,低潮位在中上段即约在鸽笼北港以上,都表现为较大程度的抬升,一般抬升 0.21~0.29 m,青龙港(3 号)位置处抬升约 0.29 m,根据经验,在上游流量一定的情况下,青龙港潮差越大,北支咸潮倒灌南支越严重,潮差减少对减轻咸潮倒灌南支越有利。至河道断面比较均匀的中下段,低潮位由于束窄后纳潮量减少而有所下降,但下降幅度较小,一般在 0.10 m 以内。由此表明束窄工程都会抬高工程上游河段的低潮位,受其影响的排水口门有启海地区的灵甸港、大新河、大洪港、青龙港和崇明北沿的鸽笼北港、界河水闸、庙港北闸和跃进港等,但对工程河段(三和港以下)的排涝不

会产生不良影响。

2.3.3 对北支各段流速变化的影响分析

表 1 为束窄工程实施后北支各段涨落潮流流速平均值统计。束窄工程实施后涨落潮平均流速大致可以南北支会潮点为分界点。会潮点上段的北支河段由于既受北支中下段涨潮流的影响,也受南支涨潮流的作用,流场变化比较复杂。由前述可知,会潮点下移是北支涨潮流作用减弱的表现,进入北支上段的南支涨潮流(在北支上段表现为落潮流方向)作用相对增强,总体平均流速增加,如 2 号控制点落潮平均流速在小束窄方案下增加 38.5%,中束窄方案下增加 65.4%,大束窄方案下增加 69.2%;会潮点以下的北支河段(5 号)涨落潮平均流速都趋于减小,这主要与潮波在传播过程中阻力增大、能量损失、潮差减小有关。而中下段(7 号、9 号、12 号)由于断面束窄较大,束窄工程实施后涨潮平均流速有一定的增大,而落潮流流速随着潮量的减小有所减少。

表 1 束窄工程实施后涨落潮平均流速变化 m/s

北支河段	潮流	小束窄方案	中束窄方案	大束窄方案
上段(2 号)	涨潮	-0.01	0	0
	落潮	0.10	0.17	0.18
中上段(5 号)	涨潮	-0.15	-0.15	-0.23
	落潮	-0.13	-0.14	-0.14
中段(7 号)	涨潮	0.02	0.01	0.06
	落潮	-0.13	-0.11	-0.03
中下段(9 号)	涨潮	0.15	0.09	0.27
	落潮	-0.11	0.08	-0.11
下段(12 号)	涨潮	0.16	0.12	0.24
	落潮	-0.17	-0.16	-0.16

2.3.4 对南支白茆沙河段的影响分析

白茆沙河段河势的变化将对长江口南支河势演变的格局产生较大的影响。白茆沙河段不仅受上游徐六径河段主流摆动的影响,也受北支倒灌的影响。表 2 表明束窄工程实施以后,南、北支落潮分流比变化较小,说明束窄工程虽然能明显地降低北支口门的进潮量,减小倒灌南支的总盐量,但南、北支分汊口的分流格局并没有大的改变;为适当增加北支落潮分流比,北支整治工程为“下段束窄+上段疏浚”方案,上段疏浚可增加 2% 的分流比。表 3 为白茆沙河段在束窄工程实施前后的流速变化,可见流速变化不大。

表 2 洪枯季南、北支落潮分流比 %

来水时节	自然状况		小束窄方案		中束窄方案		大束窄方案	
	南支	北支	南支	北支	南支	北支	南支	北支
洪季	96.9	3.1	96.8	3.2	97.1	2.9	97.2	2.8
枯季	97.6	2.4	98.0	2.0	98.4	1.6	98.5	1.5

(下转第 55 页)

表3 7月23日降雨后各小区中部
不同土层深度土壤含水率 %

小区	0~ 10 cm	10~ 20 cm	20~ 40 cm	40~ 60 cm	60~ 80 cm	80~ 100 cm
1	12.26	10.06	8.72	7.68	7.98	7.73
2	10.03	6.30	7.10	5.14	6.76	7.58
3	9.61	7.22	7.30	6.05	3.86	4.80
4	9.15	7.65	8.40	8.39	7.72	6.53
5	10.95	7.75	5.98	5.64	6.12	4.57
6	10.23	7.41	7.30	7.44	7.49	7.85
7	8.63	4.24	4.95	5.75	7.19	6.54
8	10.59	9.67	7.64	6.30	5.86	5.56
9	10.51	10.11	8.44	7.79	6.62	6.35

表4 7月27日降雨后各小区中部
不同土层深度土壤含水率 %

小区	0~ 10 cm	10~ 20 cm	20~ 40 cm	40~ 60 cm	60~ 80 cm	80~ 100 cm
1	10.23	8.39	7.40	6.83	6.23	5.92
2	8.70	5.29	4.55	8.14	5.33	6.40
3	9.83	7.33	6.29	5.03	3.67	5.74
4	8.61	6.96	7.33	7.01	5.30	4.52
5	8.19	4.62	4.75	5.57	5.45	3.62
6	8.87	6.13	6.91	7.16	7.24	7.32
7	7.63	7.69	5.23	4.54	4.95	6.04
8	9.24	7.99	6.27	6.34	4.28	3.73
9	9.05	6.81	4.06	4.93	4.90	4.98

2.3 集雨效果

从表1可见,PAM虽然不能提高土壤水分的入渗率,但却具有极好的集雨效果,而且 PAM 的用量越大其集雨效果也越好。虽然施用 2 g/m² 的 PAM 和 20 g/m² 的石膏的混合物也能起到集雨的作用,但效果没有单独施用 PAM 好,而且投资相对较高。因此,可以将 PAM 在当地用作集雨材料。

3 结 论

施用 PAM 是一种高效、低成本的控制土壤流失的方法,而且使用方便。在试验区土质条件下,还可以将 PAM 作为集雨材料使用,并且 PAM 用量越大集雨效果越好。而施用石膏既可以增加水分入渗又可以减少土壤流失,石膏用量越大作用效果也越好。当施用 PAM 与石膏的混合物时,1 g/m² 的 PAM 和 20 g/m² 的石膏就可以起到增加土壤水分入渗、减少土壤流失的作用,而且比单独施用石膏效果要好。

参考文献:

[1] 夏卫生,雷延武,刘红根. PAM 防治水土流失的研究现状及评述[J]. 土壤通报,2002,33(1):78-80.

[2] 雷廷武,袁普金,詹卫华,等. PAM 及波涌灌溉对水分入渗影响的微型水槽试验研究[J]. 土壤学报,2004,41(1):140-143.

[3] LENTZ R D. Inhibiting water infiltration with polyacrylamide

and surfactants: applications for irrigated agriculture[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2003,58(5):290-299.

[4] SMITH H J C,LEVY G J. 雨滴能量和土壤改良对渗透及侵蚀的影响[J]. 刘正杰,译. 水土保持科技情报,1994(4):37-41.

[5] YU Jian, LEI Ting-wu, SHAINBERG I, et al. Infiltration and erosion in soil treated with dry PAM and gypsum[J]. Soil Science Society of America Journal,2003,67(2):630-636.

[6] ENTRYA J A, SOJKA R E, WATWOOD M, et al. Polyacrylamide preparations for protection of water quality threatened by agricultural runoff contaminants [J]. Environmental Pollution,2002,120:191-200.

[7] 龙明杰,张宏伟,曾繁森,等. 聚合物在水土保持中的应用[J]. 水土保持通报,2000,20(3):5-9.

(收稿日期:2005-05-17 编辑:熊水斌)

(上接第 45 页)

表3 束窄工程实施后白茆沙河段涨落潮平均流速变化 m/s

流速控制点	潮流	小束窄方案	中束窄方案	大束窄方案
B1	涨潮	0.03	0.14	0.08
	落潮	0	0	0
B2	涨潮	0.03	0.16	0.04
	落潮	0.03	0.02	0.02
B3	涨潮	0.03	-0.03	0.04
	落潮	0	-0.20	0
B4	涨潮	0.03	0.15	0.03
	落潮	0	0	0
B5	涨潮	0.07	0.08	0.08
	落潮	-0.04	0	-0.04

3 结 论

通过平面二维数学模型,对长江口北支咸潮倒灌控制工程方案进行比较和影响分析,从咸潮倒灌的控制效果看,大束窄方案略优于中、小束窄方案。大束窄方案获得的土地资源最多,但因圈围区域包括崇明东滩,可能会对此地自然保护区的生态环境造成一定的影响,且大束窄方案北支出海口的冲刷影响较大;在防洪排涝方面,中束窄方案优于大束窄方案。因此综合咸潮倒灌的控制效果、束窄对河势等的负面影响和社会经济效益等方面情况,中束窄方案作为本研究的推荐方案。

参考文献:

[1] 茅志昌,陆建建. 长江口北支综合治理刍议[J]. 海洋湖泊通报,2001(1):66-70.

[2] 上海市水务局. 长江口北支咸潮倒灌控制工程及南支水源地建设专题研究[R]. 上海:上海市水务局,2004.

[3] 陈美发. 控制长江口北支咸潮倒灌支持南水北调[J]. 水利水电科技进展,2003,23(6):17-19.

(收稿日期:2005-06-02 编辑:熊水斌)