



长江口南北槽水沙输移特征异同的初步研究*

陈 语, 应 铭

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 为分析长江口南、北槽水沙输移特征的异同, 基于 2019 年洪季南、北槽同步水文观测数据开展初步研究。结果表明, 南槽沿程流速“上大下小”, 北槽沿程流速在中、下段最大。南槽中段盐度高于北槽中段, 下段至口门盐度小于北槽。南、北槽沿程垂线平均含沙量基本接近, 南槽含沙量垂向梯度更小, 近 2 kg/m^3 含沙量可悬扬至水体 $0.2H$ 层 (H 为水深), 北槽高含沙量则聚集于中下层。南槽河槽宽浅, 分层系数介于 $0.01\sim1$, 水体呈部分混合状态; 北槽河槽窄深, 盐度分层系数高于南槽, 中段分层系数大于 1, 出现高度分层。南槽航道回淤同步受悬沙落淤和推移质输沙的共同影响; 北槽在工程影响下, 悬沙造成的航道回淤问题突出。

关键词: 长江口; 南槽; 北槽; 潮流泥沙; 回淤

中图分类号: U612.23

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0108-10

Preliminary study on similarities and differences of water and sediment transport characteristics between North Passage and South Passage of the Yangtze River Estuary

CHEN Yu, YING Ming

(Shanghai Waterway Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: To analyze the similarities and differences in the water and sediment transport characteristics of the South Passage and the North Passage in the Yangtze River Estuary, we conduct a preliminary study based on synchronous hydrological observation data from the two passages during the 2019 flood season. The results show that the flow velocity in the South Passage exhibits higher upstream and lower downstream, whereas maximum flow velocities in the North Passage predominantly occur in its mid-lower reaches. Salinity in the mid-section of the South Passage demonstrate higher values compared to its counterpart in the North Passage, while salinity values in the South Passage from its lower reaches to the entrance are lower than the North Passage. Vertical-averaged suspended sediment concentrations(SSC) show comparable magnitudes between the two passages. Notably, the South Passage presents smaller vertical SSC gradients, with 2 kg/m^3 SSC can be transported up to $0.2H$ (H is water depth). In contrast, high SSC in the North Passage predominantly concentrates in mid-bottom layers. The South Passage is wide and shallow, with a stratification coefficient ranging from 0.01 to 1 , indicating a partially mixed state of the water body. In contrast, the North Passage is narrow and deep, and the salinity stratification coefficient is higher than the South Passage. The stratification coefficient in the middle-section of the North Passage is greater than 1 , showing a high degree of stratification. Back siltation in the South Passage channel is influenced by both suspended sediment deposition and bedload transport. Under the influence of engineering activities, back siltation caused by suspended sediments in the North Passage channel is particularly prominent.

Keywords: the Yangtze River Estuary; South Passage; North Passage; tidal flow and sediment; back siltation

收稿日期: 2024-10-22

*基金项目: 国家自然科学基金联合重点基金项目(U24A20181); 中交上海航道局有限公司科技研发项目(SHJKJ-2022-001)

作者简介: 陈语 (1990—), 男, 博士, 工程师, 从事港口与航道工程设计及水沙动力研究。

近年来,关于长江口 12.5 m 深水航道北槽段的水沙和回淤问题,已经成为研究的热点。航道浚深后,尽管长江口上游来沙减少了近 70%^[1],但北槽中段最大浑浊带区域仍然维持着较高的含沙量水平,近底每立方米水中的泥沙质量更是会达到几十甚至上百千克^[2]。针对北槽中段高含沙量集中、回淤集中的问题,学界已经有了较为丰硕的研究成果。纵向上,受河口环流影响,悬沙在输运过程中易汇聚于北槽中段^[3-4];垂向上,在憩流时刻受盐水分层和悬沙絮凝沉降影响,在近底层因高含沙量聚集进一步抑制紊动的正反馈过程^[5-6],也较好地解释了北槽近底高浓度含沙体影响航道回淤的机理;横向上,由于工程的实施,北槽横向流速降低,盐度在横向上造成的斜压梯度力会驱动泥沙在滩槽之间横向输移,易造成悬沙在深槽中部的聚集^[7-8]。

南槽是长江入海口中,多年洪季平均含沙量最高的汉道^[9-10]。近年来,有越来越多的学者开始关注南槽的水沙输移特征。相较于北槽,南槽同样会受盐度影响,出现水体的垂向分层^[11-12],但南槽河槽的断面形态更为宽浅,水体在潮周期内的层化相对较弱,持续时间较短^[13]。总体而言,目前对于南槽水沙输移已有的研究中,观测资料以 1~2 个站位的数据为主,对南槽沿程水沙分布特征的完整分析和南北槽水沙输移的不同特点还有待进一步深入研究。此外,北槽多年来经历了长江口深水航道治理工程以及南坝田挡沙堤加高等一系列工程的整治,河槽形态已由原先的宽浅型转变为明显的窄深型;南槽总体在还处于相对自然的河槽形态,至 2019 年航道水深仅为 5.5 m (当地理论最低潮面,下同),2020 年南槽航道治理一期工程建设后水深也仅增加至 6.0 m,仍为宽浅型河槽。南、北槽两种完全不同的河槽在相同的上、下游边界条件下,其各自的水沙输移特征会有怎样的异同,也是亟待探究的问题。

本文依据洪季南、北槽沿程大范围同步水沙观测数据,对南北槽水沙分布和输移特征的异同

进行分析,并讨论南北槽水沙垂向的差异,以期深化河口水沙运动机理认识、深水航道减淤的进一步探究和南槽航道治理深入研究提供科学依据和技术支撑。

1 工程概况

长江口作为世界第三大河口,2003—2023 年以来每年的径流量约 8 667 亿 m^3 、输沙量约 1.25 亿 t,其具有强动力、高浊度的特征。长江口深水航道治理工程于 2010 年建成,采用“整治与疏浚相结合”的治理手段,建成了水深 12.5 m、宽度 350/400 m、长度 92.2 km 的双向航道,通过双导堤加丁坝群发挥了“导流、挡沙、减淤”功能。南槽航道治理一期工程建成了水深 6.0 m、宽度 600 m (口内段)/1 000 m (口外段)的人工航道;顺接长江口 12.5 m 深水航道分流鱼嘴南线堤,沿江亚南沙南缘向下游建设了 1 条护滩堤。南槽 6.0 m 航道于 2020 年 3 月贯通。

2 数据资料情况

本文利用 2019 年洪季大潮期间(8 月 2—3 日)南槽和北槽沿程同步固定垂线水文观测数据。观测站位自南、北槽进口段一直延伸至口外,见图 1。其中,NCH1 和 CS0S 分别位于南、北槽上段;NCH2~6 位于南槽中段,CS9S~CS3S 位于北槽中段;NCH7~8 位于南槽下段,CS4S~CS7S 位于北槽下段;NCH9 位于南槽口外,CS10S 位于北槽口外。南、北槽河道沿程变化特征见图 2。可以看出,北槽段受整治工程控制,自上段至下段主要表现为窄深形态,至口外放宽;南槽上段河道较窄,至中下段明显放宽。

观测期间(前 7 d)大通流量在 5.75 万~5.91 万 m^3/s ,变幅不大,见表 1。观测期间,北槽测区风速在 1.0~9.6 m/s,南槽测区风速在 1.5~7.5 m/s,风向均以东南风为主。流速、流向观测采用 600 或 300 kHz 的声学多普勒流速剖面仪(ADCP)测量,各测点始终采用同一批仪器观测。泥

沙水样采集使用横式采样器, 采样容积为 1 000 mL。采回实验室后用焙干法进行分析。水样处理前, 先静置沉淀, 直至上部清水中不含泥沙时再将样品浓缩并注入烧杯中, 进行洗盐处理。最后, 将浓缩沙样烘干称质量后计算出测点含沙量。所有取沙测点水样均同步做盐度分析, 采用盐度计直接测定并结合硝酸银滴定法进行比测。

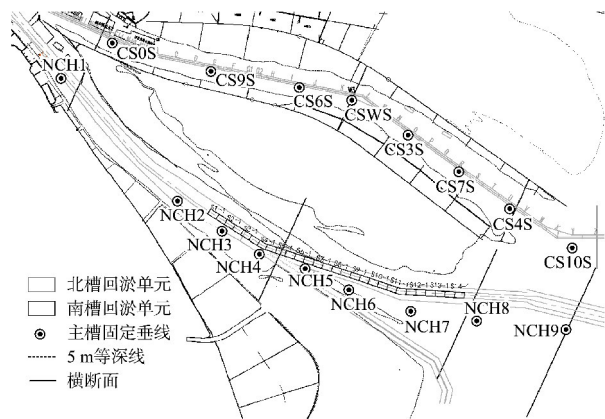


图 1 南、北槽观测站位分布
Fig. 1 Observation stations distribution in South Passage and North Passage

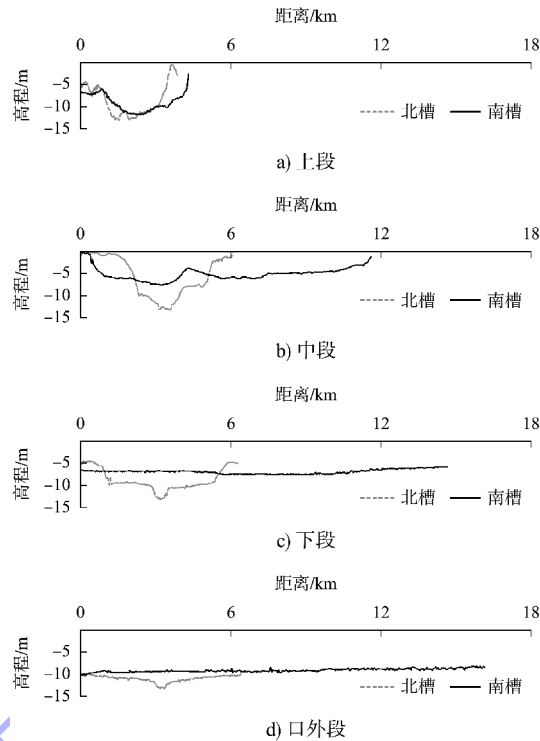


图 2 南、北槽沿程断面特征
Fig. 2 Cross-sectional characteristics along South Passage and North Passage

表 1 固定垂线水沙观测边界条件

Tab. 1 Boundary conditions of fixed vertical line water-sediment observation

时期	潮型	开始时间	结束时间	流量/($\text{万 m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	区域	潮差/m	测点
2019 年洪季	大潮	8 月 2 日	8 月 3 日	5.75~5.91	南槽主槽	4.26(中浚)	NCH 系列
					北槽主槽	4.07(北槽中)	CS 系列

3 南北槽水沙分布特征

3.1 南北槽流速分布特征

南、北槽涨、落潮平均流速分布见图 3。可以看出, 南、北槽中上段总体均表现为落潮流速大于涨潮流速, 至口外段涨、落潮流速接近; 其中北槽的涨落潮流速差异大于南槽。从两条河槽各自的沿程流速分布来看, 南槽沿程流速总体表现为“上大下小”特征, 进口段流速最大, 口外段流速最小; 北槽沿程流速总体表现为中、下段流速最大, 上段和口外段流速最小。南、北槽相比较而言, 从涨潮流速来看, 南槽上段流速大于北槽上段; 南槽中段至口外涨潮流速总体和北槽差别不大, 分别在 0.82~1.07 m/s 和 0.85~1.13 m/s。从落潮流速来看, 南槽上段同样大于北槽上段, 中段至下段南槽落潮流速明显小于北槽, 南、北

槽口外落潮流速接近。

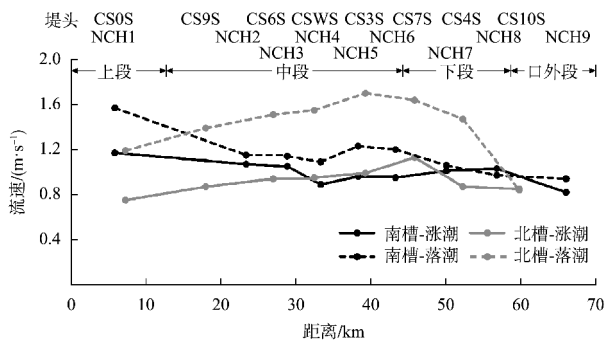


图 3 南、北槽涨、落潮平均流速分布
Fig. 3 Average velocity distribution during flood and ebb tide in South Passage and North Passage

南、北槽涨、落急时刻流速分布见图 4。可以看出, 在涨、落潮过程中, 由于南槽口门段河道宽阔, 向上段逐渐束窄, 故潮流流速在上段相对较强。随着潮流自海向陆的传播, 南槽上段会在涨、

落急分别出现 2.08 和 2.33 m/s 的垂线平均流速。北槽在整治工程的影响下,涨、落潮高流速区间出现在沿程中、下段 CSWS~CS7S 垂线处,其中涨、落急垂线平均流速最大分别可达 2.10 和 3.17 m/s。

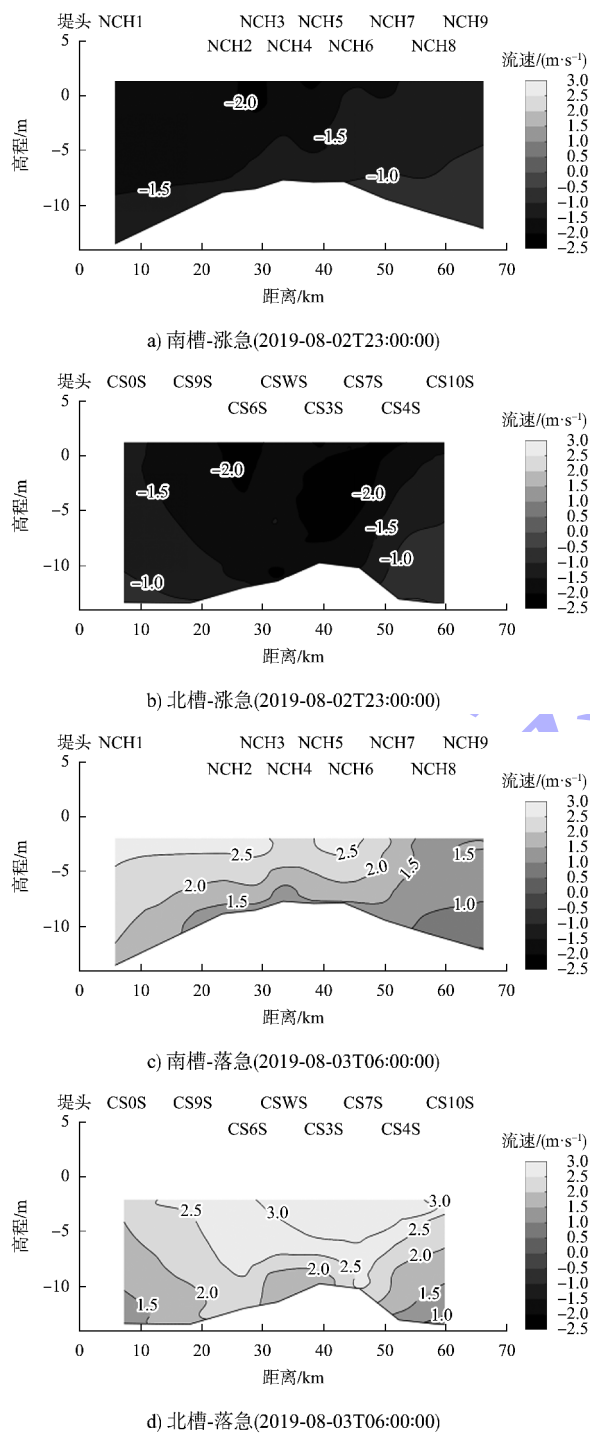


图4 南、北槽涨、落急时刻流速分布

Fig. 4 Velocity distribution at critical flood and ebb moment in South Passage and North Passage

3.2 南北槽盐度分布特征

南、北槽涨、落潮平均盐度分布见图5。可以

看出,南、北槽盐度均表现为自上段向口外段逐渐增大的特征。其中,南槽全段、北槽中上段(CS0S~CS3S)和口外段(CS10S)涨、落潮平均盐度沿程差异较小,北槽中下段(CS7S~CS4S)涨潮盐度大于落潮。南、北槽相比较而言,口门附近北槽盐度更高,口内南槽盐度更高。南、北槽进口段潮平均盐度均不超过 0.2‰;南槽中上段至中下段(NCH2~7)盐度在 0.7‰~15.5‰,高于对应区段的北槽盐度;北槽中下段(CS7S~CS4S)涨潮平均盐度高于南槽对应区段,落潮平均盐度则低于南槽;北槽口外段(CS10S)盐度整体高于南槽口外段。

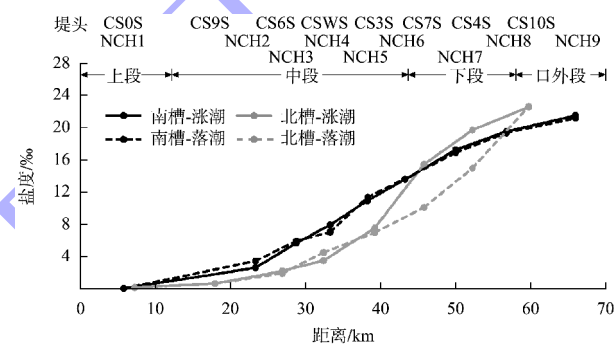


图5 南、北槽涨、落潮平均盐度分布

Fig. 5 Average salinity distribution during flood and ebb tide in South Passage and North Passage

南、北槽涨、落憩时刻盐度分布见图6。从盐度输移最远、分层显著的涨憩时刻来看,南、北槽沿程盐度分布特征存在明显的差异。在涨憩时刻,南、北槽盐水上溯的末端(以 3‰等盐度线为界)位置相近,均可以达到距导堤头 1 km 附近位置,口外段表层盐度的大小也较为接近,分别为 24.0‰和 22.4‰;但底层盐度的上溯幅度差异显著,南槽中下段(NCH6)底层盐度为 21.3‰,北槽对应位置(CS7S)的底层盐度为 25.2‰,北槽底层盐度明显更高。在盐水楔形态上表现为南槽盐水在垂向上和纵向上相对均匀,垂向和纵向等盐度线稀疏;北槽垂向和纵向等盐度线更为密集,盐度梯度更大。这一特征在南槽和北槽中段尤为显著。在落憩时刻,南、北槽盐水均出现在中、下段位置;在纵向和垂向的盐度梯度上,南槽均显著小于北槽。南、北槽的盐度分层差异特征,主要是受河槽形态的影响,南槽相对宽浅,较强

的潮动力利于盐度的混合；北槽特别是航道附近河槽窄深，垂向和横向的交换均较弱，盐度易出现明显的分层特征。

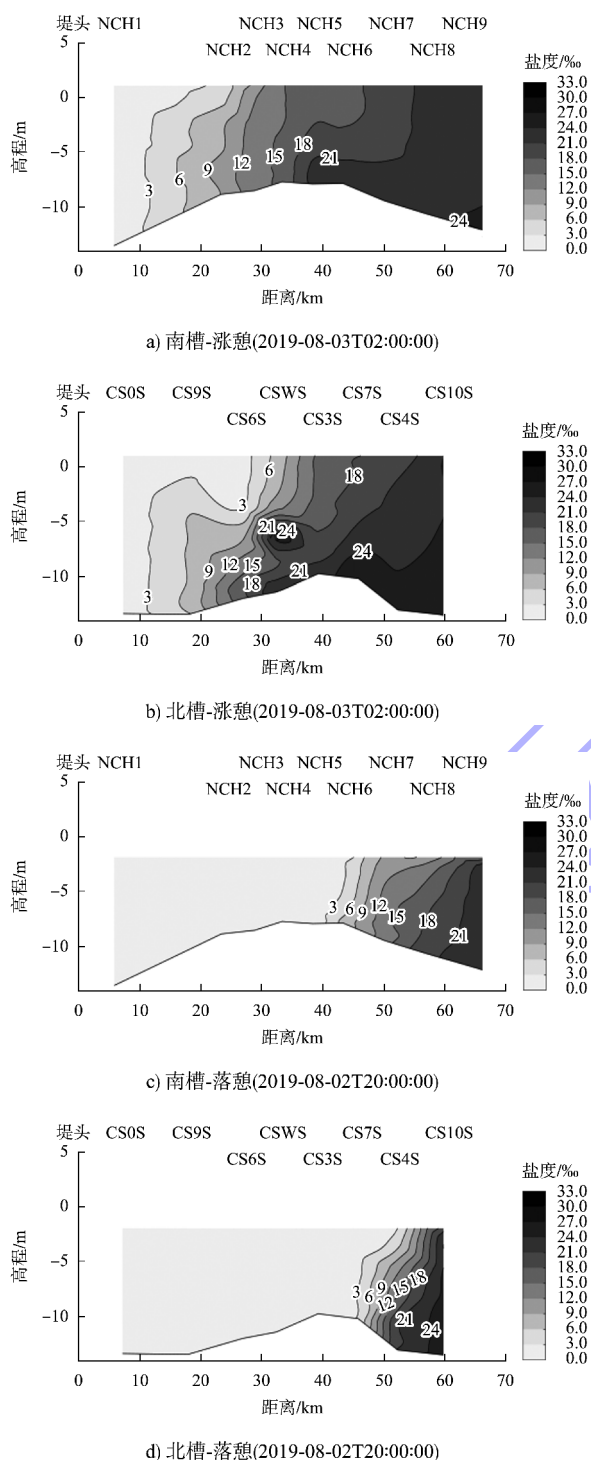


图6 南、北槽涨、落憩时刻盐度分布

Fig. 6 Salinity distribution at high-water slack and low-water slack in South Passage and North Passage

3.3 南北槽含沙量分布特征

南、北槽涨、落潮平均含沙量分布见图7。可

以看出，南、北槽含沙量分布均表现为“中间大、两头小”的特征，进口段和口外段含沙量水平较低，中部浑浊带核心区段含沙量水平显著高于上下游。从涨、落潮差异来看，南、北槽均在中部高含沙量区段呈现涨潮含沙量大于落潮，在上段和下段表现为落潮含沙量大于涨潮。南、北槽沿程各对应测点含沙量水平基本接近，除了中、下段两个测点(南槽 NCH5~6 和北槽 CS3S~CS4S)北槽含沙量略高之外，南槽总体含沙量略高于北槽。其中，进口段(NCH1 和 CS0S)南槽含沙量比北槽高 0.2 kg/m^3 左右，中上段(NCH2~4 和 CS9S~CSWS)南槽含沙量比北槽高 $0.4 \sim 0.7 \text{ kg/m}^3$ ，下段(NCH8 和 CS10S)南槽含沙量比北槽高 $0.1 \sim 0.3 \text{ kg/m}^3$ 。

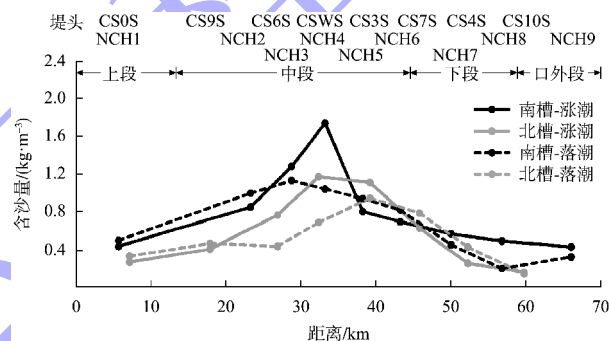


图7 南、北槽涨、落潮平均含沙量分布

Fig. 7 Average suspended sediment concentration distribution during flood and ebb tide in South Passage and North Passage

南、北槽涨、落急时刻含沙量分布见图8。可以看出，在涨急时刻，南、北槽含沙量峰值均出现在中段的 NCH4 和 CSWS 垂线(距堤头约 33 km)，底层含沙量大小分别为 7.1 和 6.0 kg/m^3 ，峰值的位置和大小接近，但峰值区段含沙量的垂向分布特征却有明显差异。南槽尽管底层含沙量更高，但垂向含沙量梯度更小，在 NCH4 垂线的 $0.2H$ (H 为水深)高度含沙量接近 2.0 kg/m^3 ；北槽对应位置的 $0.2H$ 高度含沙量不超过 0.2 kg/m^3 ，北槽水体的高含沙量主要聚集在水体的中下层，这种高含沙量的分布特征主要受到盐度分层对水体紊动的抑制，易加剧悬沙在近底层沉降，造成航道的回淤。落急时刻，南槽底层的高含沙量区段并不集中，上段至中段(NCH1~NCH6)近 38 km 范

围内的底层含沙量均在 2 kg/m^3 以上;北槽高含沙量的峰值区段集中于中下段(CSWs~CS7S)的约 13 km 范围内,底层含沙量在 $3 \sim 5 \text{ kg/m}^3$, 相邻上、下游垂线的底层含沙量均不超过 1 kg/m^3 。

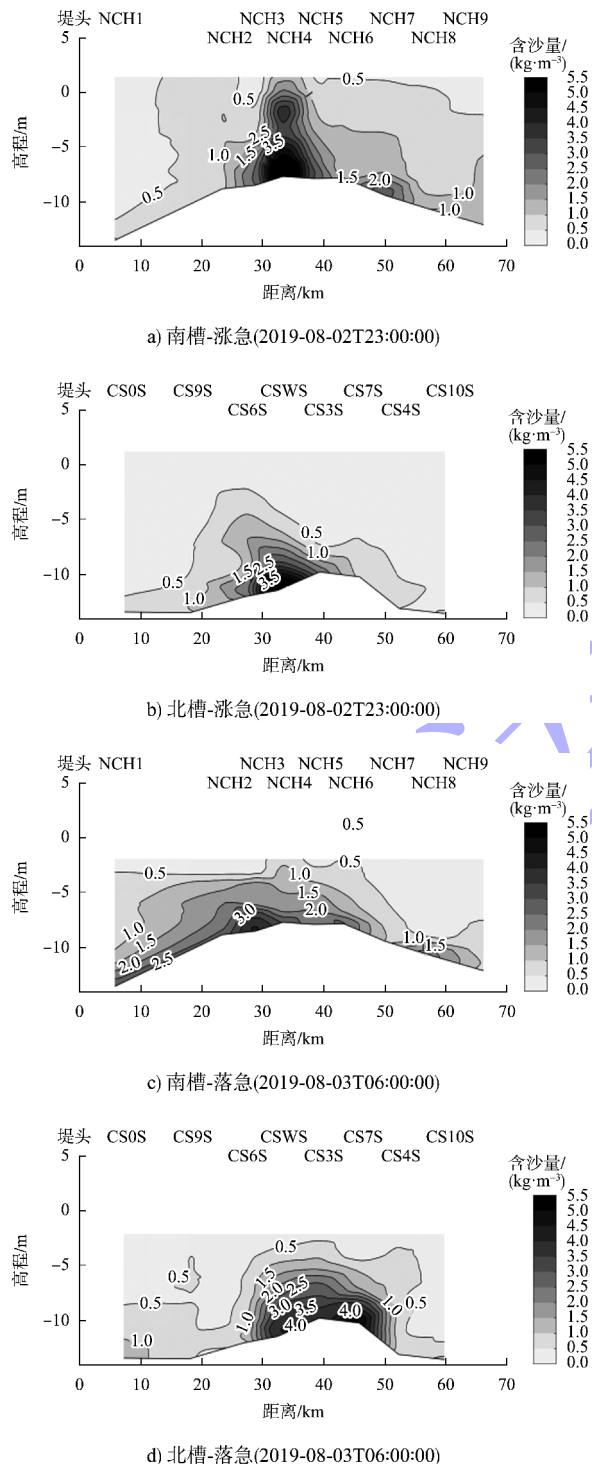


图8 南、北槽涨、落急时刻含沙量分布

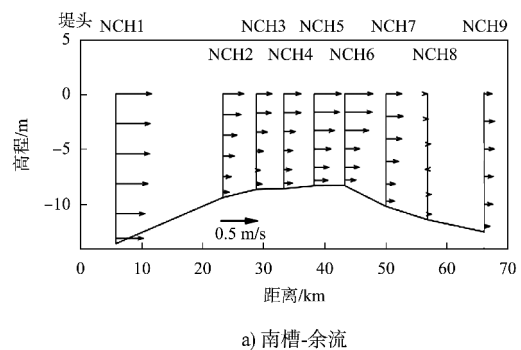
Fig. 8 Suspended sediment concentration distribution at critical flood and ebb moment in South Passage and North Passage

从含沙量的分布特征来看,与北槽相比,南槽高含沙量的分布范围较大与南槽流速“上大下小”的特征有关;同时,由于南槽较好的垂向水体混合(盐度垂向梯度小)(图6),高含沙量更易悬扬到水体的中上层,利于悬沙利用水体中上层较大的流速,在河槽中纵向输移,不易在近底层聚集落淤。

3.4 南北槽余流余沙特征

在研究河口动力的过程中,可以通过计算余流和余沙消除潮周期内的变化过程,以反映潮周期内水体和泥沙的净输运方向和速度。

南、北槽余流、余沙分布见图9。从余流角度来看,南、北槽除了下段和口外的NCH8和CS10S垂向余流在水体中、下层表现为小幅向口内输移外,总体余流均呈现为净向海输移。余流在空间分布上和绝对流速分布类似,南槽上段河道窄流速大,落潮优势明显,对应净向海方向的余流较强,上段(NCH1)由底至表层余流流速可达 $0.38 \sim 0.49 \text{ m/s}$;至中下段河道放宽,落潮优势减小,向海余流绝对值降低,至口外(NCH9)垂向各层余流仅有 $0.09 \sim 0.15 \text{ m/s}$ 。北槽余流在整治工程的影响下,中下段(CSWs~CS7S)最强,落潮优势明显,向海余流最大,局部(CS3S~CS7S)表层余流能达到 1.00 m/s 以上,底层在 $0.26 \sim 0.31 \text{ m/s}$;至口外(CS10S)由于没有了双导堤的束流作用,落潮优势减弱,垂向各层余流不超过 0.15 m/s 。从余沙角度来看,南、北槽总体均表现为在拦门沙段浑浊带核心区段余沙最大的特征,沿程余沙以向海方输运为主,余沙向海方向的沿程最大均出现在中下段,垂向上为 $0.16 \sim 0.42 \text{ kg/s}$ (NCH5) 和 $0.18 \sim 0.87 \text{ kg/s}$ (CS7S)。



a) 南槽-余流

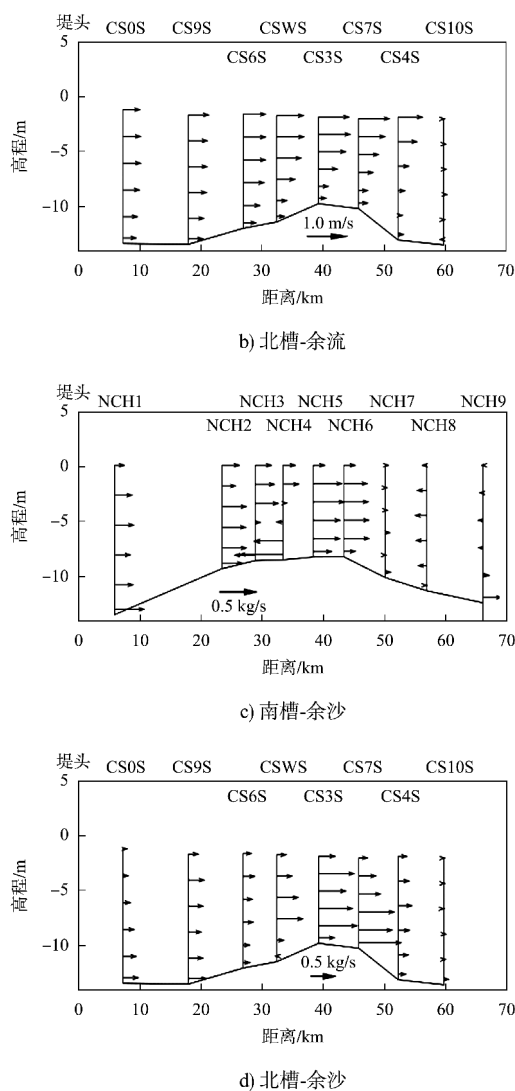


图9 南、北槽余流、余沙分布

Fig. 9 Distribution of residual currents and residual sediment in South Passage and North Passage

4 讨论

4.1 南北槽盐度垂向分层差异

河口水体的层化能抑制水体紊动,进而直接影响潮流的混合和输运过程^[14]。分层系数可用于表征河口水体的混合强度^[15](盐度分层系数 N 等于底表层盐度差与垂线平均盐度之比),当 $N>1$ 时,水体高度分层或出现盐水楔形态;当 $0.01\leq N\leq 1$ 时,水体呈部分混合状态;当 $N<0.01$ 时,水体呈垂向均匀混合状态。

南、北槽涨、落潮平均盐度分层系数见图10。南槽河槽沿程水体在涨、落潮周期内,总体呈部分混合状态,中段NCH5垂线在落潮期甚至可呈现均匀混合状态($N=-0.02$)。北槽沿程分层系数

整体大于南槽对应区段,其中,北槽中段CS6S~CS3S垂线在涨潮期水体高度分层($N>1$),弯段位置的CSWS垂线在落潮期仍旧呈高度分层状态。南、北槽不同的盐度分层特征,从上文中盐度剖面的特征(图6)同样能反映。在盐度上溯最远的涨憩时刻,南槽中段(NCH4)表底层盐度差异在3‰以内,北槽中段(CSWS)表底层盐度差达到16‰。

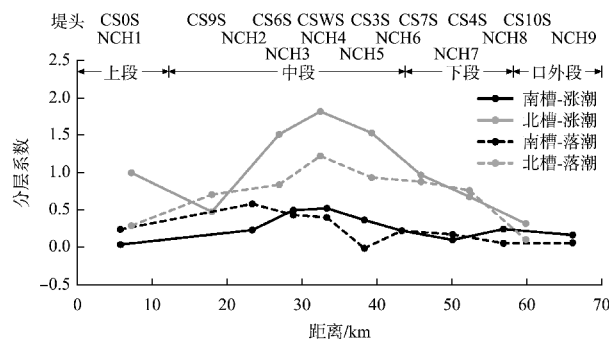


图10 南、北槽涨、落潮平均盐度分层系数

Fig. 10 Average salinity stratification coefficient during flood and ebb tide in South Passage and North Passage

已有研究表明,河槽的断面形态是影响环流强度和水分层特性的重要因素^[16]。在窄深河槽中,因密度梯度造成的环流会在涨潮前期带来水体混合,在涨潮后期导致较为稳定的水体层化,这种层化-混合的变化强度要远强于宽浅河槽^[17]。长江口12.5 m深水航道竣工后,北槽中段受南北两侧导堤、丁坝的束流作用,潮流由原先的旋转流变为往复流。同时,底层1‰~5‰的盐水沿着深槽上溯得更远,水体垂线混合被抑制,北槽在涨憩时刻从部分混合型状态转变为强层化状态^[18-19]。尽管南槽河段近年来同样表现出了一定的窄深化趋势^[20],但河槽形态仍较北槽宽浅得多,涨潮过程中的水体垂向交换和横向交换均显著强于北槽,在潮周期内的水体层化始终不显著。

4.2 南北槽悬沙输移对航道回淤的影响

结合本文余流、余沙的特征可知,虽然两个河槽均在中段表现为落潮流速大于涨潮,但由于南、北槽中段涨潮期含沙量高于落潮,两个河槽在各自的含沙量峰值区段(NCH4和CSWS)的水体中下层,均存在余沙向陆的特征,表明局部存在

悬沙汇聚的过程(图9)。对北槽来说,中段CSWS所在的航道弯段处,正是航道回淤集中的区段;对南槽来说,NCH2~3所在的中上段,有可能是悬沙落淤较为明显的区段。

对浚深后的河口航道来说,随着河槽深度的增加,深槽与两侧边滩的滩槽高差增大,纵向和横向的泥沙输运都是造成航道内悬沙落淤的重要因素。北槽由于航道浚深幅度大,且在南北两侧导堤丁坝的控制下,河槽向窄深化发展,悬沙造成的航道回淤问题突出。长江口12.5 m深水航道建成后,北槽内的流态由旋转流转变为往复流,在北槽中段河口纵向环流加强,表现为上游余流余沙向海、下游余流余沙向陆的汇聚作用^[21-23]。垂向上,除了上文提到的盐度造成的水体层化抑制紊动,产生近底高浓度悬沙并形成回淤之外^[24],泥沙自身的作用也不容忽视。在涨憩时段,由于水体紊动强度降低且盐度增大,细颗粒泥沙在电化作用学和生物因子影响作用下的聚集,易产生较大粒径的絮团,获得更大的沉降速度,也能促进近底高浓度悬沙产生的正反馈作用^[25-26]。此外,北槽航道回淤泥沙来源的研究表明,由于涨潮时潮水可以越过导堤,且涨潮时水体主要为偏北方向运动,故泥沙随着越堤流,会从九段沙一侧进入北槽内部^[27-28]。据金缪等^[29]的估算,横向输运进入北槽的泥沙每年能达到2 000万~3 000万 m^3 。基于此认识,北槽南坝田挡沙堤加高工程于2015年11月开工建设,2018年完成先期工程建设(加高至3.5 m,吴淞基面,下同),2020年完成完善工程验收^[30](加高至4.5 m)。工程实施后,北槽含沙量水平和年均常态回淤量降低,显著节约了航道维护费用,实现了减淤目标^[31-32]。

相比于北槽航道,尽管南槽航道的垂线平均含沙量水平与北槽接近,但南槽含沙量的垂向梯度更小(图7、8),高含沙量可以借助水体中上层较大的流速纵向输移,而不是聚集于水体的中下部。已有研究表明,在南槽一期6.0 m航道完工后,南槽主槽纵向的水动力和含沙量分布特征并没有发生明显变化。结合航道回淤分布特征来看,

航道高回淤区段主要集中于江亚南沙的沙尾附近,高含沙量区段与航道高回淤区段并未完全重合,南槽航道目前的回淤除了受到悬沙落淤的影响以外,同样还受到推移质输沙的影响^[33]。

5 结语

1) 南槽沿程流速表现为“上大下小”特征,北槽沿程流速在中、下段最大,上段和口外段最小。对应区段而言,南槽上段和近口外段流速大于北槽,中段流速小于北槽。

2) 南、北槽进口段盐度均较小,南槽中上至中下段盐度高于对应区段的北槽,下段至口门盐度小于北槽。南槽盐度在纵向上和垂向上的梯度均小于北槽,在中段拦门沙区域尤为显著。

3) 南、北槽沿程含沙量均在中部拦门沙区段最高,进口段和口外段低。南、北槽沿程各对应测点含沙量水平基本接近,除了中、下段北槽含沙量略高之外,其余区段南槽含沙量略高于北槽。南槽含沙量垂向梯度更小,近 2 kg/m^3 含沙量可以悬扬至水体的 $0.2H$ 高度;北槽的高含沙量则主要聚集在水体的中下层。

4) 南槽河槽总体宽浅,沿程水体在涨、落潮周期内,总体呈部分混合状态($0.01 \leq N \leq 1$);北槽河槽总体窄深,盐度分层系数整体大于南槽,中段会出现高度分层($N > 1$)。

5) 结合已有研究可知,长江口12.5 m深水航道北槽段中下段悬沙汇聚的区段,正是回淤集中的区段,回淤主要受到悬沙落淤的影响;南槽当前一期6.0 m航道高含沙量区靠近中上段,与航道高回淤区段并未完全重合,航道的回淤除了受到悬沙落淤的影响以外,同样还受到推移质输沙的影响。

参考文献:

- [1] GUO L C, SU N, TOWNEND I, et al. From the headwater to the delta: a synthesis of the basin-scale sediment load regime in the Changjiang River [J]. Earth-science reviews, 2019, 197: 102900.
- [2] WAN Y Y, ZHAO D Z. Observation of saltwater intrusion

- and ETM dynamics in a stably stratified estuary: the Yangtze Estuary, China[J]. Environmental monitoring and assessment, 2017, 189: 89.
- [3] JIANG C, DE SWART H E, LI J, et al. Mechanisms of along-channel sediment transport in the North Passage of the Yangtze Estuary and their response to largescale interventions[J]. Ocean dynamics, 2013, 63: 283-305.
- [4] ZHU C Y, VAN MAREN D S, GUO L C, et al. Feedback effects of sediment suspensions on transport mechanisms in an estuarine turbidity maximum [J]. Journal of geophysical research: oceans, 2022, 127(6): e2021JC018029.
- [5] GE J Z, ZHOU Z Y, YANG W L, et al. Formation of concentrated benthic suspension in a time-dependent salt wedge estuary [J]. Journal of geophysical research: oceans, 2018, 123(11): 8581-8607.
- [6] LIN J L, VAN PROOIJEN B C, GUO L C, et al. Regime shifts in the Changjiang (Yangtze River) Estuary: the role of concentrated benthic suspensions[J]. Marine geology, 2021, 433: 106403.
- [7] CHEN Y, HE Q, SHEN J, et al. The alteration of lateral circulation under the influence of human activities in a multiple channel system, Changjiang Estuary [J]. Estuarine, coastal and shelf science, 2020, 242: 106823.
- [8] ZHOU Z Y, GE J Z, VAN MAREN D S, et al. Study of sediment transport in a tidal channel-shoal system: lateral effects and slackwater dynamics[J]. Journal of geophysical research: oceans, 2021, 126(3): 2020JC016334.
- [9] 李九发, 时伟荣, 沈焕庭. 长江河口最大浑浊带的泥沙特性和输移规律[J]. 地理研究, 1994, 13(1): 51-59.
- LI J F, SHI W R, SHEN H T. Sediment characteristics and transport patterns of the maximum turbidity zone in the Yangtze River Estuary[J]. Geographical research, 1994, 13(1): 51-59.
- [10] 陆子骞, 张国安, 张卫国, 等. 泥沙来源减少后长江口最大浑浊带变化研究[J]. 泥沙研究, 2022, 47(3): 67-72.
- LU Z Q, ZHANG G A, ZHANG W G, et al. Processes of the maximum turbidity zone of the Yangtze Estuary under the background of reduced sediment sources[J]. Journal of sediment research, 2022, 47(3): 67-72.
- [11] LU T, WU H, ZHANG F, et al. Constraints of salinity- and sediment-induced stratification on the turbidity maximum in a tidal estuary [J]. Geo-marine letters, 2020, 40: 765-779 .
- [12] 吴增斌, 郭磊城, 吴雪枫, 等. 2020 年特大洪水作用下长江口南槽水沙输移特征[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(2): 295-304.
- WU Z B, GUO L C, WU X F, et al. A Field study of hydrodynamics and sediment transport in the South Passage of Changjiang River Estuary during big river flood in July 2020[J]. Oceanologia et limnologia sinica, 2022, 53(2): 295-304.
- [13] 陈语. 分汊河口横向环流及其格局转化研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
- CHEN Y. The lateral circulation and its regime shift in a multiple-channel estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2020.
- [14] HANSEN D V, RATTRAY M. Gravitational circulation in straits and estuaries[J]. Journal of marine research, 1965, 23: 104-122.
- [15] 潘定安, 沈焕庭. 闽江口的盐、淡水混合[J]. 海洋与湖沼, 1993(6): 599-608.
- PAN D A, SHEN H T. The mixing of salt and fresh water in the Minjiang River Estuary [J]. Oceanologia et limnologia Sinica, 1993(6): 599-608.
- [16] VALLE-LEVINSON A. Density-driven exchange flow in terms of the Kelvin and Ekman numbers[J]. Journal of geophysical research: oceans, 2008, 113: C04001.
- [17] SCHULZ E, SCHUTTELAARS H M, GRÄWE U, et al. Impact of the depth-to-width ratio of periodically stratified tidal channels on the estuarine circulation[J]. Journal of physical oceanography, 2015, 45 (8): 2048-2069.
- [18] 徐俊杰. 基于底边界层研究的航道回淤机制分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- XU J J. Study on near bottom dynamics and sediment processes in turbidity maximum [D]. Shanghai: East China Normal University, 2009.
- [19] 范中亚, 葛建忠, 丁平兴, 等. 长江口深水航道工程对北槽盐度分布的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2012(4): 181-189.
- FAN Z Y, GE J Z, DING P X, et al. Effect of the deep waterway project on the salinities in the north passage of the Changjiang Estuary[J]. Journal of East China Normal

- University(natural science), 2012(4): 181-189.
- [20] LUAN H L, DING P X, WANG Z B, et al. Decadal morphological evolution of the Yangtze Estuary in response to river input changes and estuarine engineering projects[J]. *Geomorphology*, 2016, 265: 12-23.
- [21] LIU G F, ZHU J R, WANG Y Y, et al. Tripod measured residual currents and sediment flux: impacts on the silting of the deepwater navigation channel in the Changjiang Estuary [J]. *Estuarine, coastal and shelf science*. 2011, 93(3): 192-201.
- [22] 应铭, 季岚, 周海. 长江口北槽 12.5 m 深水航道回淤的物理过程[J]. *水运工程*, 2017(11): 77-85.
- YING M, JI L, ZHOU H. Siltation physical process of the Yangtze Estuary North Passage 12.5 m deep-draft channel [J]. *Port & waterway engineering*, 2017 (11): 77-85.
- [23] 薛为. 长江口南港北槽水域水文特征分析[J]. *水运工程*, 2024(2): 107-112, 119.
- XUE W. Hydrographic characteristics for south channel and north passage of Yangtze River Estuary [J]. *Port & waterway engineering*, 2024(2): 107-112, 119.
- [24] 沈洪, 顾峰峰, 万远扬, 等. 长江口洪季北槽深水航道区域悬沙沉降速度估算[J]. *海洋工程*, 2013, 31(2): 88-93.
- SHEN Q, GU F F, WAN Y Y, et al. Settling velocity of suspended sediment at the north passage deep-water channel of the Yangtze Estuary in the flood season [J]. *The ocean engineering*, 2013, 31(2): 88-93.
- [25] GUO C, HE Q, GUO L C, et al. A study of in-situ sediment flocculation in the turbidity maxima of the Yangtze Estuary [J]. *Estuarine, coastal and shelf science*, 2017, 191: 1-9.
- [26] LI L J, ZHU J R, CHANT R J, et al. Effect of dikes on saltwater intrusion under various wind conditions in the Changjiang Estuary [J]. *Journal of geophysical research: oceans*, 2020, 125(7): e2019JC015685.
- [27] 刘杰, 王元叶, 赵德招, 等. 长江口北槽悬沙来源的观测与分析[J]. *泥沙研究*, 2015(5): 19-23.
- LIU J, WANG Y Y, ZHAO D Z, et al. Study on suspended sediment sources in the North Passage of the Yangtze Estuary [J]. *Journal of sediment research*, 2015 (5): 19-23.
- [28] 邢超峰. 河口滩槽水沙特性及交换研究: 以长江口北槽及相邻水域为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- XING C F. A study on hydrodynamics and sediment transport dynamics between flats and channels in estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2016.
- [29] 金镠, 虞志英, 何青. 滩槽泥沙交换对长江口北槽深水航道回淤影响的分析[J]. *水运工程*, 2015(2): 115-123.
- JIN L, YU Z Y, HE Q. Response of deepwater channel in north passage to water and sediment exchange between channel and shoal in the Yangtze Estuary [J]. *Port & waterway engineering*, 2015(2): 115-123.
- [30] 应铭, 季岚, 曹慧江, 等. 长江口 12.5 米深水航道南坝田挡沙堤加高工程总平面方案研究[J]. *海洋工程*, 2020, 38(4): 19-28.
- YING M, JI L, CAO H J, et al. The study on general plan layout of the jetty heightening project in the southern groin field of Yangtze estuary 12.5 m deep-draft waterway [J]. *The ocean engineering*, 2020, 38 (4): 19-28.
- [31] 王珍珍, 刘杰. 南坝田挡沙堤加高工程(+3.5 m)实施后北槽水沙变化[J]. *中国水运(下半月)*, 2021, 21(14): 94-96.
- WANG Z Z, LIU J. Changes in water and sediment in the North Passage after the construction of the South Dam field sand-blocking dike elevation (+3.5 m) [J]. *China water transport (the second half of the month)*, 2021, 21(14): 94-96.
- [32] 付桂, 应铭, 左书华, 等. 长江口深水航道减淤工程实施效果评价[J]. *水运工程*, 2022(12): 134-139, 203.
- FU G, YING M, ZUO S H, et al. Evaluation on effect of silting reduction project in deep-water channel of Yangtze Estuary [J]. *Port & waterway engineering*, 2022(12): 134-139, 203.
- [33] 王珍珍, 刘杰. 南槽航道治理一期工程 6.0m 航道基建期回淤分布及原因初析[J]. *中国水运(上半月)*, 2021(11): 100-102.
- WANG Z Z, LIU J. A preliminary study on the siltation distribution and causes during the construction period of the 6.0 m channel in the first phase of the South Passage project [J]. *China water transport (the second half of the month)*, 2021(11): 100-102.