

岸线码头密度对河道水动力和 污染物输移影响分析 ——以武汉河段为例

熊海滨 孙昭华 陈立 刘长杰¹

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

【摘要】: 为研究岸线码头密度对河流水动力变化及污染物输移的影响, 以武汉河段为例, 基于 Mike21 模型建立了适用于该河段的平面二维水动力-水质模型, 计算了长为 9.6km 的岸线范围内布置不同密度码头群后引起的附近区域内水位、流速变化以及突发水污染事故后的自净能力变化, 从空间差异性、最大变幅等角度对比了三者的差异, 并归纳了码头密度与水动力条件、污染物浓度变幅之间的关系。结果表明: (1) 随着码头密度增加, 工程区上游水位变化较流速更敏感, 工程区及下游局部位置水位变幅较小, 而流速变化较为敏感, 表现为前沿主流区流速增大, 近岸区流速减小; 当码头密度大于 1.25~2.5 座/km 的临界范围后, 水动力条件随码头密度的变幅逐渐减缓。(2) 修建码头后, 受水动力变化影响, 工程区河段上游污染物浓度变化呈“峰前减、峰后增”, 但工程区下游呈“峰前增、峰后减”的特征; 工程区间内表现为主流区浓度增大、近岸带浓度减小、高浓度滞留时间总体增加的变化特点。(3) 受码头工程群影响, 无论是区整体上, 还是局部范围内, 污染物浓度相对水动力条件变幅更大, 对河段内水源地的取水可能造成不利影响。以上认识对于河流岸线开发利用规模选取和效应评估具有参考意义。

【关键词】: 岸线 码头密度 水动力 污染物输移

【中图分类号】: X522 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)09-2205-12

随着长江经济带国家战略的逐步实施, 长江航运、临港产业等建设将迎来新的发展机遇期, 对岸线开发利用将提出新的高要求。不合理的岸线开发利用布局和方式可能对河道防洪、自净等自然功能产生不利影响^[1], 对此开展系统研究十分必要。

河流岸线利用的主要方式是修建港口码头。对于码头引起的水动力变化及其对防洪、河势的影响, 往往是工程可行性论证的重点^[2,3], 但对于码头群引起的累积影响仅有少量研究, 且主要针对防洪问题^[4,5], 码头密度与码头群体累积效应之间的非线性作用规律, 还远未得到系统揭示。除了防洪问题, 江河湖库水动力条件变化可能引起的水环境和水质问题, 在工程实践中同样值得重点关注, 但以往对该类问题的研究主要集中在湖库内流速变缓、换水周期加长导致的水体富营养化、水质恶化等方面^[6,7]。河流岸线利用引起的水动力变化主要体现在局部河段或近岸区域, 具有强烈空间差异性, 由此引起的自净能力变化与湖库显著不同, 但关于该方面的研究几近空白。

¹**作者简介:** 熊海滨(1994~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为河流数值模拟. E-mail: fc_xhb@whu.edu.cn
孙昭华, E-mail: Lnszh@126.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407802); 国家自然科学基金项目(51879198)

对天然河流水环境安全威胁最大的是突发性水污染事件。以长江为例,2017 年长江河流水质 I~III 类水占总评价河长的 83.9%,总体较好。但由于过往船只多、沿线分布有大量化工企业,易发生突发性水污染事件^[8]。不完全统计显示,自 1990 年以来长江干线的水污染事故多达 30 余起^[9],包括 1997 年 6 月南京锚地的“大庆 243”游轮爆炸沉没事故,2001 年武穴港两艘浓硫酸货船沉没事故,2008 年 9 月黄石阳新一化工厂的废水泄露事故等。随着航运及工业迅猛发展,突发水污染事件风险不断增大。2010 年全国仅生态环境部直接调度或处置的突发水环境事件就达 156 起^[10]。在此背景下,突发事故引起的污染物输移,成为河流水环境安全预警和防控的重点^[11,12]。岸线大规模利用之后,水动力条件变化对污染物输移和水体自净带来哪些影响,应是岸线利用合理性评估的重要依据。

武汉河段是长江干线重要城市江段,一方面岸线资源丰富,码头数量众多,另一方面防洪压力大、水质要求高,岸线利用需求和开发规模之间矛盾突出,极具研究的代表性和典型性。关于武汉河段内码头的水动力影响效应和突发水污染事件模拟,以往已开展过一些零散的案例研究,但这些研究尚未建立二者的联系^[13~15]。尤其是,不同码头密度引起的洪枯期水动力变化有何差异,水动力条件与水体自净能力存在何种联系,这些问题涉及到建港岸线的开发模式和规模,需要补充系统的研究工作。

本文以武汉河段为例,利用平面二维“水动力-水质”模型研究了岸线布置不同密度码头情况下的水位、流速变化和污染物迁移过程,多角度分析归纳了三者的变化规律。研究成果可深化码头岸线对河流防洪、自净等功能影响的认识,为岸线高效利用提供参考。

1 研究河段

武汉河段上起纱帽山,下迄阳逻镇,全长约 70.3km^[16]。本文以码头密集的中下段,即沌口至阳逻长约 50.6km 的区间为对象开展研究(图 1a)。河段进口沌口处河宽约 1450m,出口河宽约 1400m,最窄的龟山附近宽约 1100m,分汊的天兴洲附近河宽近 4000m。武汉是沿江重点防洪城市,本河段全境均为一级堤防。作为千万人口特大城市,长江是武汉市主要水源地,河段内一、二级水源地保护区水质标准分别不得低于地表水 II 类、III 类标准。

根据该河段的岸线建港适宜性评价^[17]及岸线实际利用情况,I 级岸线带主要分布在两处,一是鲇鱼套至徐家棚附近,二是阳逻上游附近,这两个区域也是当前众多已建港区的所在地。相比河宽较大的阳逻上游附近,鲇鱼套—徐家棚一带河宽更窄,水动力条件更易受到码头建筑物影响,故选取鲇鱼套—徐家棚岸线段为拟定码头布置区,该段岸线长约 9.6km。

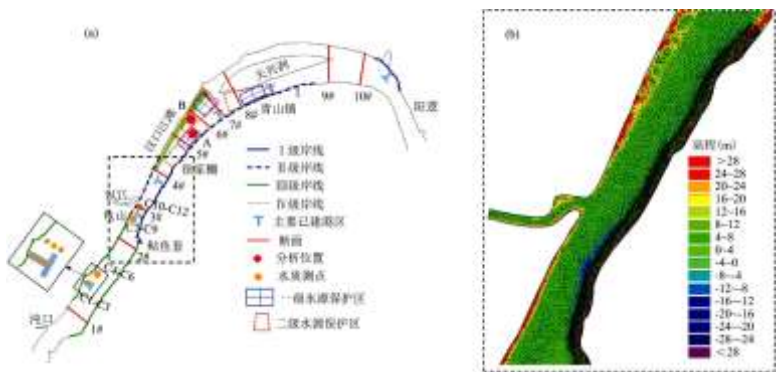


图 1 研究河段范围及码头布置区计算网格

2 研究方法与计算方案

2.1 数学模型

MIKE21 Flow Model FM 模型在平面二维自由表面流数值模拟方面具有强大的功能, 本文基于其中的水动力-(HD)和输运-(TR)模块, 建立了沌口至阳逻河段“水动力-水质”数学模型。模型采用非结构三角化网格, 网格总数为 23254 个, 网格边长控制在 50~80m, 对包含码头布置区在内的 300m 水域宽度范围进行局部加密(图 1b), 加密区网格边长控制在 15~40m。模型的控制方程由水流连续性方程、运动方程和水质对流扩散方程组成, 具体参见 MIKE21FM 科学手册^[18, 19]。由于各类污染物输移规律基本类似, 因而水质模型选取较为常用的化学需氧量(COD)为代表性污染物^[20]。

模型的输入数据主要有入流资料、水质浓度、地形资料等; 可计算输出模型范围内的水位(水深)、流速及水质浓度的时空分布。本文地形高程采用 2011 年研究河段的 1:10000 实测河道地形插值确定; 进口边界采用沌口流量和拟定的 COD 浓度过程, 并考虑了汉江入汇; 出口边界采用阳逻水位和零梯度水质出口条件。初始条件中水面高程设置比出口水位略大, 河段水平和垂直流速均为 0m/s; 初始浓度根据河段内实测 COD 浓度确定。模型主要参数中干湿条件、涡粘系数采用软件推荐值, 河床糙率 n 及 COD 横向扩散系数 E_y 、衰减系数 K 根据实测资料和相关文献进行率定调整。

2.2 模型验证

依据有关部门在 2009~2011 时段汛、枯期对研究河段 10 个断面(图 1a)开展的 5 个测次水位和流速资料分别率定了洪、中、枯各级流量下的糙率 n , 其值为 0.018~0.03, 并进行了验证。

图 2、图 3 以多年平均流量 $22600\text{m}^3/\text{s}$ 为例, 给出沿程各断面计算流速、水位与实测值的比较。可见, 流速最大误差在 0.2m/s 以内, 且主流带表现出沿程自左向右逐渐过渡的特点, 与以往研究相一致^[21]。水位的平均绝对误差为 0.025m , 均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)为 0.031m , 纳什效率系数(Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient, NSE)为 0.99 , 模拟结果良好。此外, 结合相关文献^[22]中的算例数据(水质监测点见图 1a)对水质模块进行了验证。参考文献[22]中取值, COD 衰减系数 K 设为 $2.89 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$, 横向扩散系数 E_y 设为 $0.55\text{m}^2/\text{s}$, 验证结果显示(图 4): 浓度的平均绝对误差为 0.63mg/L , 平均相对误差为 8.71% , RMSE 为 0.47mg/L , NSE 为 0.88mg/L 。为分析水质系数 K 、 E_y 对 COD 浓度影响, 考虑其对浓度影响同向性, 在率定值基础上将二者同时增大和减小 10%、20%, 计算各水质测点的 COD 浓度, 如图 4, 可以看出, 水质参数 K 、 E_y 与 COD 浓度大小呈负相关, 其引起的浓度变化幅度在 $-5.8\% \sim 7.5\%$ 。但对整体浓度分布影响不大。由以上可见, 所建模型可视合理。

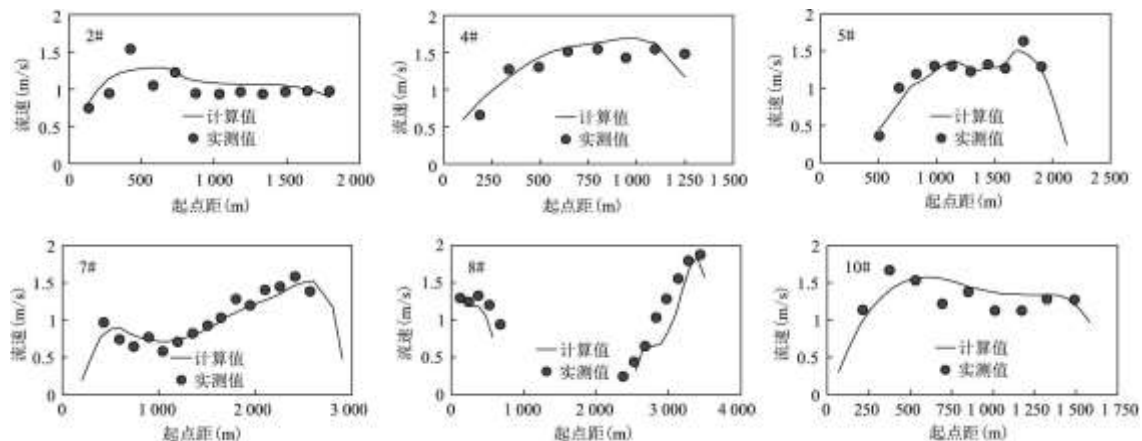


图 2 流速模拟值与实测值对比

2.3 码头建筑物的概化

码头建筑物尺寸参考了长江中下游已建码头的平均参数, 平台大小统一设置为 $100\text{m} \times 20\text{m}$, 下方均匀布置 13×5 根桩, 桩径

1m;引桥设为 150m×15m, 桩基 10×1 个, 桩径 1m。码头呈 T 字形沿布置区岸线均匀分布, 其中的单个码头采用实际工程中广泛使用的 Pier 模块进行概化^[23,24], 其原理是将桩基作为过水区域处理, 在桩基所在位置增加有效拖曳力 F, 再通过动量公式转化为切应力参与计算。具体公式如下:

$$F = 0.5 \rho_w \gamma C_D A_c V^2 \tag{1}$$

$$\tau_p \Delta_x \Delta_y = nF \tag{2}$$

式中: ρ_w 为水体密度, kg/m³; γ 为流线系数; C_D 为拖曳力系数; A_c 为桩的有效阻水面积, m²; V 为水流流速, m/s; τ_p 为切应力, N/m²; Δ_x 、 Δ_y 为计算网格边长, m; n 为计算网格桩基础个数。

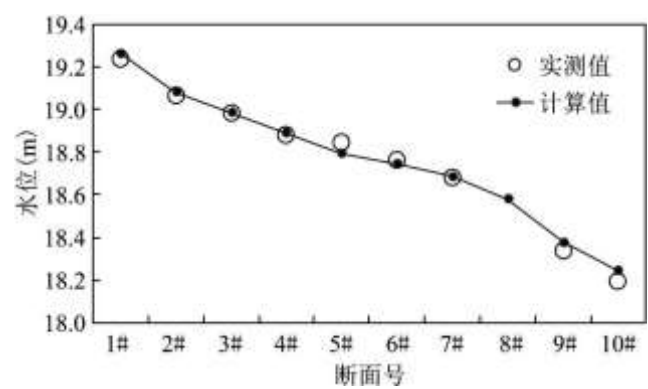


图 3 水位模拟值与实测值对比

2.4 计算方案

文献[14]的模拟计算发现, 当码头群的密度大于 1.33 座/km 时, 码头对水动力的影响将产生相互干扰。参考这一认识, 分别考虑 0.31、0.62、1.25、2.5、5 座/km(鲇鱼套—徐家棚 9.6km 范围沿右岸岸线均匀布置 3、6、12、24、48 座码头), 与无码头的情况共组成 6 种工况。

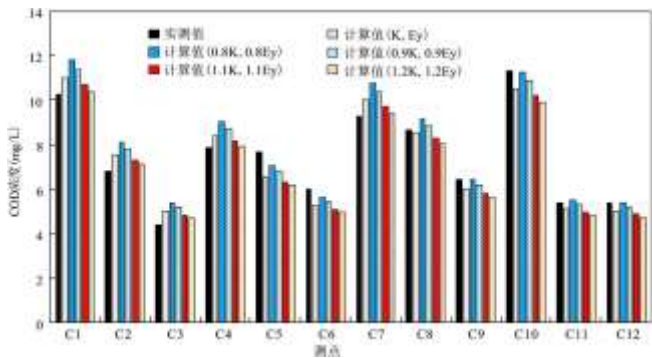


图 4 COD 浓度模拟值与实测值对比

洪水流量下的水位壅高值和近岸流速增幅影响堤防安全, 中枯水流量下水动力变化则直接影响自净能力。为便于各流量级下水动力条件变幅综合比较, 选取了洪、中、枯三级典型流量 39600、22600、12700m³/s。

枯水期是河流自净能力最弱时期^[22, 25], 因而对污染物输移的模拟仅考虑 $12700\text{m}^3/\text{s}$ 流量级。由河段进口附近测点 2017 年 COD 取样数据, 除个别月份外其浓度基本在 $9\sim 11\text{mg/L}$ 之间波动, 故取 12 个月的平均浓度作为背景浓度, 其值为 10.1mg/L 。以假想发生在武汉河段上游的突发性污水泄漏为原型, 假设污水排放时长 1h, 其中含 COD 污染物总量为 2743.2t, 事故发生后进口断面 COD 浓度迅速增至 60mg/L , 将突发水污染事件的起始时间计为 0 时刻。

对结果的统计和分析按照从粗到细、从总体到局部的思路: 首先分析全河段的变化特征, 在此基础上, 重点探究码头布置区附近水域详细的水动力、污染物输移变化情况, 包括布置区附近水源地水质变化分析。其中, 对水源地的考察选取了左右岸各一个典型位置, 见图 1a 中 A、B 点所示。水动力条件的变化以流速、水位为考察指标。污染物输移的变化以有无码头情况下的 COD 浓度空间分布、典型断面浓度峰值、峰现时间(从 0 时刻至观测位置出现浓度峰值所需时间)、滞留时间(特定区间或位置的污染物浓度超过某临界值的时长)等来反映^[26, 27]。在水动力条件、污染物浓度变化与码头密度关系的研究中, 为便于对比, 以流速、水位(水深)及 COD 浓度的相对变幅作为考察指标。

3 结果与讨论

3.1 水动力条件变化

3.1.1 水动力变化总体特征

图 5 为岸线利用前后河道水动力条件变化情况(以码头密度为 5 座/km 为例), 与自然情况相比, 表现出以下特征: 码头布置区前沿及上游水位有所抬高, 洪水流量下抬高更为明显, 仅码头布置区尾缘局部区域水位小幅下降, 全河段内水位变幅为 $-0.03\sim 0.07\text{m}$; 受码头群局部阻水作用, 在右侧岸线附近形成了狭长的流速减小区, 流速最大减幅为 -1.12m/s , 但其前沿形成了流速增大区, 最大增幅为 0.24m/s , 流速变化的空间范围以及流速变幅均随着流量增大而增大。

3.1.2 码头密度与水动力条件变幅的关系

图 6 分别为修建码头群后的上游最大水位增幅、流速最大变幅与码头密度关系, 可以看出, 在码头密度为 0.31 座/km 时, 不同流量下水位、流速变幅都较小, 差异不大, 水位壅高值低于 0.01m , 流速增幅低于 0.04m/s , 流速减幅介于 $0.187\sim 0.299\text{m/s}$ 。对比设计洪水条件下单个码头导致的局部水位、流速变幅的以往计算结果, 与本文基本在同一量级^[28]。由图 6 还可看出, 随着码头群密度的增大, 各流量级下的水位、流速变幅明显增大。码头密度 5 座/km 与 0.31 座/km 的情况相比, 水位、流速变幅甚至增大了一个量级, 这反映了工程群体的影响效应远大于单个工程。需要指出的是, 当码头密度增加大于 $1.25\sim 2.5$ 座/km 之后, 水动力因子的增长趋于减缓。究其原因, 是由于码头密集时, 所产生的尾迹相互干扰, 迭加效应趋于减弱, 这与河流阻力增幅随着河道中障碍物密度增加而逐渐减缓的规律较为类似^[29]。文献[12]提出的 1.33 座/km 的临界值位于本文提出的区间之内, 不同在于前者是仅根据洪水水位增幅得到, 且其计算工况相对较少。本文计算基于 2011 年地形, 但考虑研究河段河势较为稳定, 并且不同地形下的规律认识相近, 说明只要河段不发生大的趋势性调整, 本文提出临界区间依然具有参考价值。

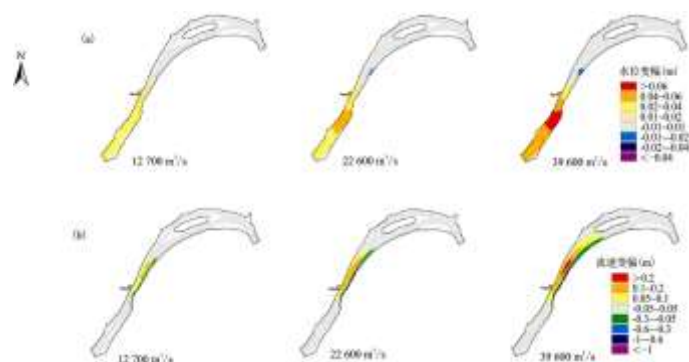


图 5 各级流量有无码头情况下的水位差异 (a)、流速差异 (b)

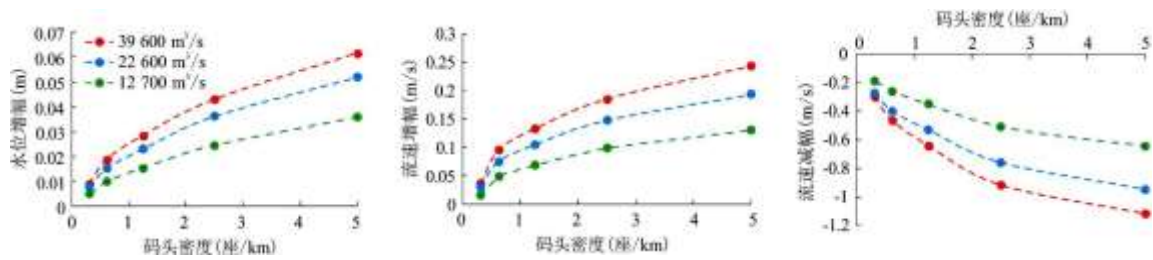


图 6 不同流量下水流条件最大变幅与码头密度关系

3.2 污染物输移特征的变化

3.2.1 污染物迁移总体特征

图 7 中分别为无码头情况下 2.5、4.5、6.5、8.5h 时刻的 COD 分布，以及码头群修建前后的同时刻浓度差异 (以码头密度 5 座/km 为例)。可以看出，自然情况下高浓度污染团输移轨迹与河道主流基本一致，浓度值顺水流方向逐渐衰减，由于两岸流速慢，河道两岸形成了狭长的滞留区。与天然情况相比，修建码头群后的污染物浓度变幅存在明显的增大和减小区，其位置和规模随时间不断变化：在污染物尚未迁移至码头布置区前 (2.5h)，表现为污染团前沿 (峰前) 浓度减小，而污染团尾部 (峰后) 浓度增大，变幅为-5.9~3.0mg/L；当污染物迁移至码头布置区时 (4.5h)，码头前沿的流速增大区 COD 浓度相对增大，而布置码头的岸线附近 COD 浓度降低，变幅为-8.7~7.5mg/L；由于主流区流速增大，加快了污染物向下游方向输移速度，从而造成了污染物迁移至码头布置区出口断面时 (6.5h) 呈现污染团前沿 (峰前) 浓度增大、污染团尾部 (峰后) 浓度减小的特征，变幅达-14.3~11.1mg/L，而码头岸线附近的流速减小则降低了污染物向下游迁移速度，导致该水域的 COD 浓度直至 8.5h 后仍呈增大状态。

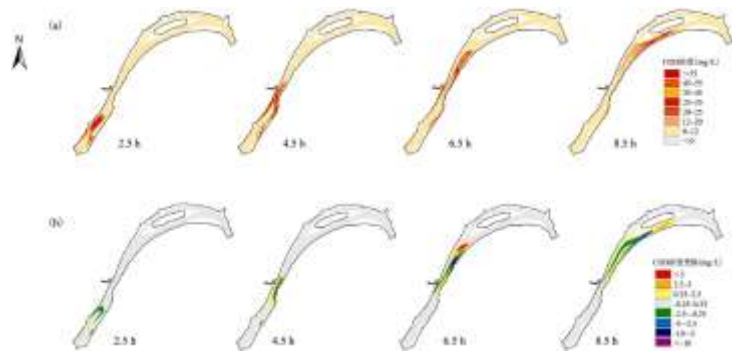


图 7 无码头时 COD 浓度分布 (a) 及有无码头情况下 COD 浓度变化 (b)

3.2.2 重点区间的污染物输移特征

以 2#与 5#断面之间的区域为对象 (图 1)，考察不同情况下污染物浓度横向分布的变化特征。对于图 7 中的峰前浓度减小、增大两种现象，选取变化最为明显的时刻，分别对应 3.275h (2#断面平均浓度呈峰前减小) 和 5.95h (5#断面平均浓度呈峰前增大)。图 8 中给出这两个时刻的流速、COD 浓度沿断面变化情况，由图可见，与水动力条件的变化类似，码头密度越大，COD 浓度变幅越大。但 COD 浓度变幅最大的位置与流速变化最大位置并不重合，前者主要集中于河道中部大水深、大流速区域。

图 9 中给出了 2#和 5#断面的断面平均的浓度峰值大小及峰现时间，可以看出：2#断面浓度峰值随码头密度增大而逐渐减小，最大减幅为 0.13mg/L，而峰现时间呈延后态势，最大延后 0.02h；5#断面浓度峰值亦随码头密度增大而减小，最大减幅为 1.5mg/L，不同的是，其峰现时间呈提前态势，最大提前 0.12h。之所以出现以上现象，是由于码头群上游河段受壅水影响流速略有减小，而码头群所在河段过流面积被挤压导致流速增大，由此导致高浓度污染团进入工程河段的时刻延后，进入之后则下移加快，这种效应随着码头密度增大而越趋明显。至于峰值的减小，则是由于码头群的存在导致近岸带流速明显减小(图 8)，对断面尺度的平均浓度变化产生缓冲作用，使得断面平均意义上的污染物浓度涨落过程被坦化。

图 10 中统计了不同码头密度下 2#~5#断面区间内 COD 浓度超过 II、III 类水(15、20mg/L)的超标时间，该时间以任一网格浓度超标起算，以所有网格浓度低于临界值截止。由图 10 可见，与无码头的情况相比，区间内 COD 浓度高于 II 类水的时间有所增加，且码头密度越大增幅越大，最大增幅为 0.8h。但从区间内 COD 浓度超 III 类水的持续时间可以发现，当码头密度增加到一定时，其超标时间反而下降。导致这种现象的原因与图 9 类似，主要在于近岸的流速减小区对整体的污染物输移过程产生了缓冲作用，导致峰值坦化而过程加长。图 10 中的规律同时也说明，不论从断面平均意义上，还是平面内任一网格来看，这种峰值坦化的现象都是存在的。

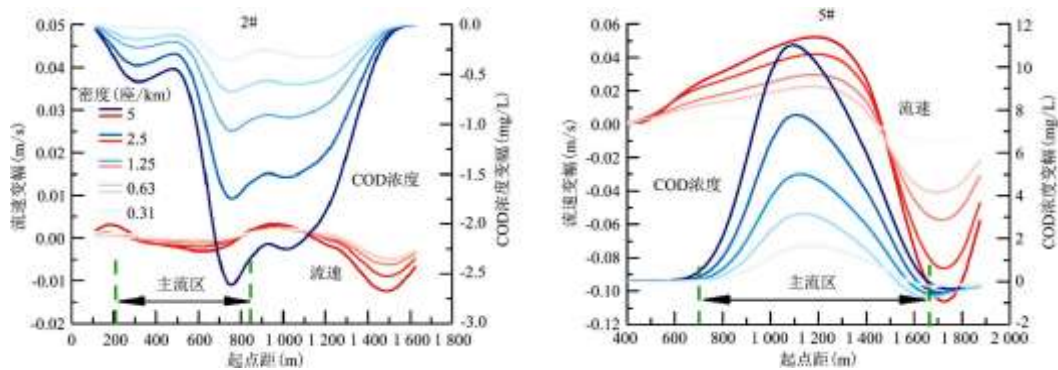


图 8 特定时刻不同码头密度下横断面 COD 浓度、流速

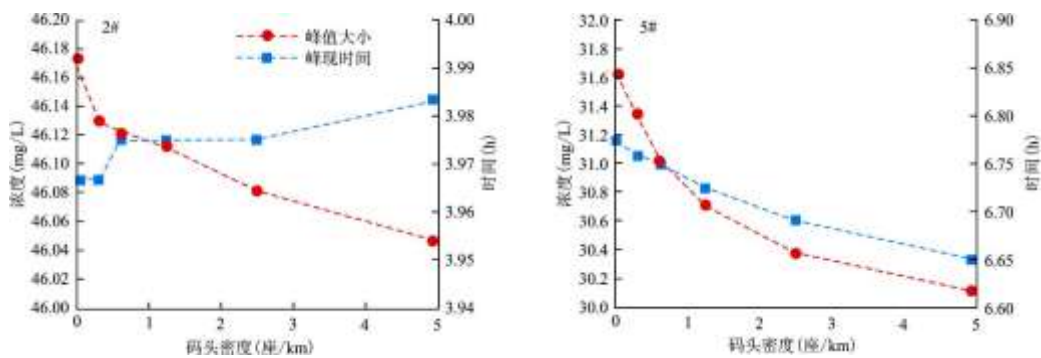


图 9 不同码头密度下进出口断面平均 COD 浓度峰值及传输时间

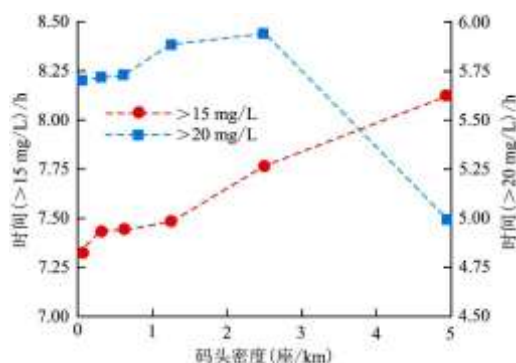


图 10 不同码头密度下区间内 COD 污染物滞留时间

3.2.3 典型位置污染物输移特征变化

考察有无码头情况下 A、B 两位置的 COD 浓度变化过程如图 11。可见，由于 A 点位于靠右岸的主流区一侧，该位置的 COD 浓度及工程后浓度变幅总体上明显大于 B 点。从两位置的 COD 浓度历时过程来看，靠近右岸的 A 点浓度峰值随码头密度增大而减小，由无码头时的 32.5mg/L (IV 类水质标准为 30mg/L) 下降至 5 座/km 码头密度时的 27.37mg/L，而靠近左岸的 B 点浓度峰值则略有所增大，最大增幅为 1.54mg/L。由图 11 还可看出，A、B 两点的污染物滞留时间均有所延长，但位于右岸的 A 点由于浓度峰值大，其峰型坦化的影响更大。统计了不同工况下 A 点超过 II 类水体标准的持续时间，随码头密度增加，该值分别为 2.41、2.44、2.48、2.58、2.73、2.68h，最大增幅达 11.2%。之所以会产生这种现象，是由于优良码头岸线一般处于水深较大且靠近主航道区域^[17]，这些位置与污染物主输移带位置相近，码头修建后的阻水效应对污染物输移产生缓冲，必然导致高浓度区的输移历时加长。综上可见，在岸线利用之后发生高浓度污染团过境时，对岸侧水域需同时注意污染物浓度峰值和水质超标历时的增加，而下游同岸一侧应重点关注污染物滞留时间的增加。

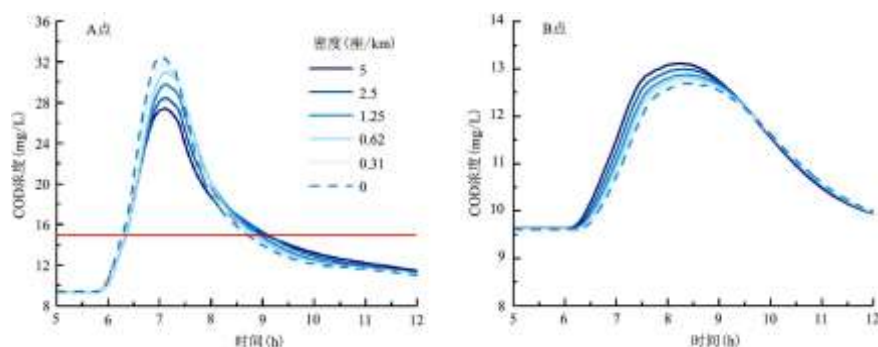


图 11 码头群布置区下游代表点 COD 浓度变化

3.3 不同码头密度条件下水动力、污染物输移变化特征的综合比较

图 12 在网格尺度上归纳了各级流量下水动力条件最大变幅与码头密度之间的关系，其中的水动力条件变幅指整个计算域内变化最大的网格上的值。为利于比较，采用了相对变幅，对于图 12a 中的水位变幅而言是指 $\frac{\text{工程后水位最大变幅}}{\text{无工程情况下对应位置水深}}$ ，图 12b 中为 $\frac{\text{工程后流速最大变幅}}{\text{无工程情况下对应位置流速}}$ 。由图可见，不同流量下的水位变幅~码头密度关系差异不大，其变化

范围在 0.04%~0.3%之间；流速变幅~码头密度关系在中枯两级流量下相差不大，洪水流量级下略显偏大，流速变幅范围在 1.57%~13.77%。流速减小区的流速变幅分析发现，其总体变化规律与图 12b 类似，但变幅更大，介于-20.48%~-78.92%。总体而言，图 12 与图 6 中规律类似，即码头密度大于 1.25~2.5 座/km 之后，水流条件变化的增幅减慢。

图 13 中分别以 2#和 5#断面为对象，从断面平均尺度上归纳了枯水流量级下各因素最大变幅与码头密度之间的关系。为便于不同因素之间比较，图中依然采用了相对变幅，含义类似图 12,但采用的是断面平均值。可以看出，处于工程区上游的 2#断面附近，水位对工程的响应较流速更为敏感，最大变幅达 0.48%,而 COD 浓度变幅对码头密度增加最为敏感，工程前后的差异最大可达 4.36%。处于工程区下游的 5#断面上，水位基本不变，断面平均的流速值也变化甚微，但断面平均的 COD 浓度最大变幅却达 13.31%,远大于 2#断面。这一现象说明，总体上码头群对 COD 输移的影响较其对水流条件的影响更为显著，并且范围更大，尤其是在工程区下游附近断面，断面上流速增减几乎抵消，但断面 COD 浓度较无工程时明显增大。2#和 5#断面分别对应了工程区进出口，区间内其他断面变化情况介于 2#和 5#断面之间，二者的差异说明了码头群对 COD 浓度的影响沿程逐渐增大。

综合图 12、13 以及前文的规律分析，可将修建码头工程后引起的各因素变化规律归纳如表 1。可见，各因素的变化具有明显空间差异性，并且总体表现出码头密度越大，差异越明显的特征。综合来看，码头岸线对污染物输移的影响大于水动力因素，且考虑污染物区间滞留时长变化，码头密度不宜大于 1.25 座/km。

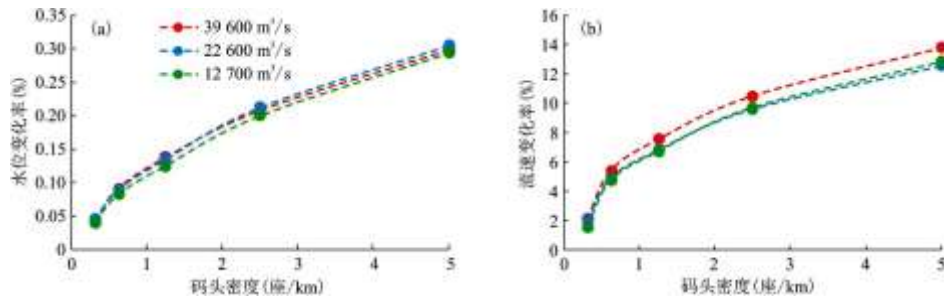


图 12 不同流量下水位、流速最大变幅与码头密度的关系

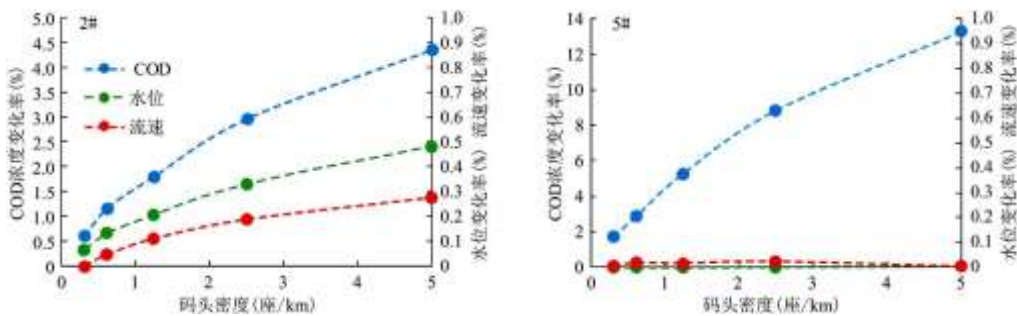


图 13 断面平均 COD 浓度、水位、流速的最大变幅与码头密度的关系

表 1 修建码头工程后引起的各因素变化规律

受影响因素	变化特征
-------	------

水位	码头区上游变幅大，下游几乎不变；变幅随流量级增大而增大，随码头密度增大而增大，码头密度增加 1 座/km, 洪水流量下引起的水位变幅 0.012m
流速	码头区流速变幅大，码头岸线一侧减小而对侧增大，减幅大于增幅，横向具有明显不均匀性，这些特征随码头密度增大而增强；断面平均流速变幅小，与码头密度无关
污染物浓度	越靠近码头岸线区段出口，受影响越大，峰值坦化而历时增长；左右侧增减变化不可抵消，变幅随码头密度增大而增大，码头密度为 5 座/km 时引起的局部浓度最大变幅 15.1mg/L, 断面平均浓度最大变幅 3.6mg/L。当码头密度大于 1.25 座/km 时，区间滞留时间增幅较大

4 结论

利用武汉河段平面二维水动力—水质数学模型，模拟计算了单侧岸线密集修建码头前后的水动力变化特征和污染物输移特征，分析了码头密度与二者的关系，得到以下结论：

(1) 修建码头后，不同流量下河段水动力变化规律类似，表现为工程区上游水位抬高，岸线前沿主流区流速增大、工程区流速减小；随着流量级和岸线码头密度增大，水动力条件的变幅和范围也增大，但存在 1.25~2.5 座/km 的临界值，码头密度小于该临界值时，群体累积效应最为显著。

(2) 突发污染事故情况下，污染物向下游迁移过程中，受工程区附近水动力变化影响，表现出明显的空间差异性，上游的浓度峰现时间延迟，下游的峰现时间提前，主流区污染物浓度增大，而码头岸线附近浓度减小，在码头群的对污染物输移的缓冲作用下，工程区间内的浓度峰值被坦化但历时加长，靠近码头密集岸线下游一侧尤其要注意这种污染物滞留时间增长的现象。

(3) 码头岸线对污染物输移的影响较其对水动力条件的影响幅度和范围更大，码头岸线的规划和开发利用，必须同时重视码头密度对行洪和水体自净能力的影响，建议码头密度不宜大于 1.25 座/km。

需要指出的是，本文的研究仅是基于武汉河段 2011 年地形计算得到，一些认识仅适用于目前河势格局较为稳定的情况，对于其他类似河段，还应注意实际河道内岸线几何形态和走向所带来的河段之间的差异。

参考文献：

[1] 谈广鸣, 姚仕明, 黎礼刚. 河湖岸线和内河洲滩资源高效利用与保护中的关键科学技术问题与预期成果展望[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(3):1-8.

[2] 王玲玲, 徐雷诺. 周口港弯道码头工程水动力特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(2):134-139.

[3] 孙东坡, 曹兵, 王鹏涛, 等. 甬江扩建油码头对所在河段的行洪影响分析[J]. 水利水运工程学报, 2008(3):1-7.

[4] 黄本胜, 程香菊, 袁丽蓉, 等. 码头桩群对河道行洪与流场影响的三维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2010, 25(1): 99-105.

[5] 张细兵, 卢金友, 蔺秋生. 长江中下游岸线利用对防洪累积影响初步研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(9): 1138-1142.

-
- [6]赖格英,王鹏,黄小兰,等.鄱阳湖水利枢纽工程对鄱阳湖水文水力影响的模拟[J].湖泊科学,2015,27(1):128-140.
- [7]刘长杰,余明辉,周潮晖,等.输水对于桥水库水质时空变化的影响[J].湖泊科学,2019,31(1):52-64.
- [8]长江水利委员会.长江流域及西南诸河水资源公报[N].
- [9]董瑞瑞,陈和春,王继保,等.汉江中下游突发性水污染事故预测模型研究[J].水力发电,2017,43(12):1-5.
- [10]许静,王永桂,陈岩,等.中国突发水污染事件时空分布特征[J].中国环境科学,2018,38(12):4566-4575.
- [11]王庆改,赵晓宏,吴文军,等.汉江中下游突发性水污染事故污染物运移扩散模型[J].水科学进展,2008(4):500-504.
- [12]龙岩,徐国宾,马超,等.南水北调中线突发水污染事件的快速预测[J].水科学进展,2016,27(6):883-889.
- [13]岳红艳,陈凤玉,黄莉,等.武汉沌口码头工程河段河床演变及防洪评价[J].人民长江,2005(4):35-37.
- [14]汪鹏.岸线开发利用对河道防洪影响的初步研究[D].长江科学院,2008.
- [15]张楚天,杨勇,杨中华,等.江河突发性水污染事故动态模拟与预警——以长江武汉段为例[J].长江流域资源与环境,2013,22(10):1363-1368.
- [16]卢金友,岳红艳.长江武汉河段河道整治方案浅析[J].泥沙研究,2008(3):33-37.
- [17]王传胜,王开章.长江中下游岸线资源的特征及其开发利用[J].地理学报,2002,57(6):693-700.
- [18]MIKE by DHI. MIKE21 Flow Model, Hydrodynamic Module, Scientific Documentation, 2009.
- [19]MIKE by DHI. MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation, 2012.
- [20]傅慧源.长江干流水域纳污能力及限制排污总量研究[J].人民长江,2008,39(23):40-42.
- [21]孙昭华,冯秋芬,韩剑桥,等.顺直河型与分汊河型交界段洲滩演变及其对航道条件影响——以长江天兴洲河段为例[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(4):647-656.
- [22]邴建平,邓鹏鑫,徐高洪,等.三峡水库运行后长江汉阳段污染物扩散规律研究[J].人民长江,2018,49(19):26-32.
- [23]卢程伟,周建中,江焱生,等.基于 MIKE FLOOD 的荆江分洪区洪水演进数值模拟[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(5):905-916.
- [24]任志杰,王振奥,陆海建. Mike21 软件桩群概化方法在高桩码头中的应用[J].水运工程,2017(10):118-124.
- [25]闫芊,陈立兵,郭文,等.1997-2011 年长江徐六泾江段流量与水质变化[J].生态与农村环境学报,2013,29(5):577-580.

-
- [26]陶亚, 雷坤, 夏建新. 突发水污染事故中污染物输移主导水动力识别——以深圳湾为例[J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 888-897.
- [27]杨中华, 朱政涛, 槐文信, 等. 鄱阳湖水利调控对湖区典型丰枯水年水动力水质影响研究[J]. 水利学报, 2018, 49(2): 156-167.
- [28]胡清玲, 蔺秋生, 高海静, 等. 河道范围内修建码头工程的防洪影响评价[J]. 人民长江, 2008, 39(10): 23-25.
- [29]PAGLIARA S, CHIAVACCINI P. Flow resistance of rock chutes with protruding boulders[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(6): 545-552.