

# 海洋工程施工悬浮泥沙源强及扩散规律研究进展

张 琴

(上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335)

**摘要:** 各类海洋工程如码头、航道、海上风电、海底管道管线、填海造陆、防波堤等涉及的抛石、爆破、疏浚、打桩、开沟、吹填溢流等作业环节产生的悬浮物, 在水动力作用下输移、扩散, 会引起周边海域悬浮泥沙浓度增加, 对海洋生态环境产生不利影响。文章对国内施工悬浮泥沙浓度扩散规律研究方法和数值模型中悬浮泥沙源强的选取方法进行了综述, 为海洋工程施工过程产生的悬浮泥沙扩散研究提供参考和依据。

**关键词:** 海洋工程; 悬浮物; 扩散规律; 源强

**中图分类号:** X145      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3096(2021)06-0176-09

**DOI:** 10.11759/hyxx20200913001

随着人类对海洋资源的开发利用日益加剧, 各类海洋工程, 如港口码头、航道、海上风电、海底管道管线、填海造陆、防波堤等逐渐增多, 其涉及的抛石、爆破、疏浚、开挖或吹填溢流等作业环节会扰动水底, 由此产生的悬浮泥沙高浑浊水团由于水动力条件作用产生的输移、扩散会加大周边水体悬浮泥沙的浓度, 严重影响海洋水环境质量, 威胁水生动植物生存, 影响水生生态系统健康<sup>[1-3]</sup>, 因而许多学者关注施工悬浮泥沙的扩散规律和对海洋生态环境的影响。开展并准确掌握海洋工程施工引起的悬浮泥沙扩散源强是上述工作的基础, 对于研究悬浮泥沙扩散规律和对海洋生态环境的影响具有重要意义。对此, 国内外一些学者开展了现场观测研究工作, 如1990年Mott MacDonald<sup>[4]</sup>开展了疏浚泥沙再悬浮系数试验, 得到绞吸式挖泥船泥沙再悬浮率, 进而可以推算出源强; 1991年戴明新<sup>[5-6]</sup>通过在天津港的大量现场实测资料推算得出链斗式挖泥船和绞吸式挖泥船作业时的悬浮泥沙源强, 为后续很多学者开展悬浮泥沙扩散模拟提供了类比依据; 陈杰等<sup>[7]</sup>通过开展现场观测, 得到了围填海工程溢流口悬浮物源强。但是总体而言, 现阶段国内外针对海洋工程施工引起的悬浮泥沙扩散源强开展现场观测较为少见, 基本上采取经验公式计算和类比分析为主, 且各类经验公式较多, 经验参数选取不一, 难以选择, 因此, 文章总结了目前国内施工悬浮物扩散规律研究方法和数值模型中悬浮物源强的选取方法, 针对不同类型施工方式, 推荐相适应的源强公式或者源强取值,

为后续海洋工程施工过程产生的悬浮泥沙扩散的研究提供参考和依据。

## 1 施工悬浮物扩散规律研究方法

施工悬浮物扩散规律研究方法主要以现场观测法和数值模拟法为主, 部分学者采用现场观测与理论分析相结合或现场观测与数值模拟相结合的方式开展研究。

### 1.1 现场观测法

现场观测是理论分析和数值模拟研究的基础, 分为传统方法和现代方法。传统的观测方法是在海洋工程施工过程中在垂向上采集1~4个水样, 然后采用重量法测得含沙量<sup>[8-13]</sup>。戴明新<sup>[8]</sup>通过不同类型挖泥船施工时水中悬浮物的取样监测, 分析了几种疏浚船舶的污染机理及对施工区域海域环境的影响, 现场观测结果表明靶吸式挖泥船造成的悬浮物影响范围最大, 链斗式挖泥船次之, 绞吸式挖泥船最小。何东海等<sup>[9]</sup>通过直接采取水样来观测疏浚物倾倒引起的悬浮泥沙扩散浓度, 了解疏浚物倾倒后的悬浮物

收稿日期: 2020-09-13; 修回日期: 2020-10-25

基金项目: 上海勘测设计研究院有限公司科标业课题[2018HJ(8)-002; 中国长江三峡集团有限公司项目资助(201903173)]

[Foundation: Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd Branch Research Project, No. 2018HJ(8)-002; China Three Gorges Corporation Project, No. 201903173]

作者简介: 张琴(1992—), 女, 江西省抚州市人, 工程师, 硕士, 主要从事水环境数值模拟及环境影响评价研究。E-mail: 1104264732@qq.com

扩散特征, 结果表明由倾倒引起的悬浮物浓度增加而形成的云团在 15~30 min 后漂离倾倒点, 30~60 min 后, 云团基本消失, 且由倾倒引起的悬浮物增量效应也基本结束, 疏浚物倾倒造成水体悬浮物浓度增高的影响在顺流方向 1.5 km 左右基本结束。张绍华等<sup>[10]</sup>采用取样监测法对绞吸式挖泥船疏浚作业、耙吸式挖泥船疏浚和溢流引起的悬浮物扩散浓度开展现场观测, 观测结果表明底泥悬浮后边扩散边沉降, 水中含沙量随离源距离的增加衰减较快, 离挖泥船距离越近, 水体中悬浮物浓度越大。当溢流发生后, 挖泥船附近水域悬浮物浓度增加, 表层悬浮物浓度增幅较大。陈杰等<sup>[7, 11]</sup>采用传统的现场观测法和理论分析相结合的方式, 以围填海工程溢流和链斗式挖泥船疏浚为例, 基于泥沙对流扩散方程, 利用悬浮物扩散现场观测数据, 得到了围填海工程溢流和挖泥船疏浚作业引起的悬浮物扩散水深平均表达式, 在此基础上, 对围填海工程溢流和挖泥船施工可能引起的悬浮物扩散范围进行讨论, 得到了悬浮物扩散的规律。郭玉臣等<sup>[12]</sup>在临时性海洋倾倒区开展了 3 次倾倒实验, 用现场采样测得的悬浮泥沙浓度数据对泥沙输运扩散模型中一些主要参数如紊动扩散系数、泥沙沉速进行了计算和率定, 在验证率定良好的基础利用泥沙输运模型对施工悬浮物扩散规律进行了进一步研究。传统采样法操作简单、成果可靠, 但能得到的样品数有限, 主要适用于挖泥船疏浚、疏浚物倾倒和吹填溢流等定点作业时产生的悬浮物浓度观测。

现代方法包括光学、声学测量方法和遥感技术反演法。光学(OBS、LISST-100X 等)和声学(ABS、ADCP、ADP 和 ADV 等)方法是采集现场水体浊度或声强信号信息, 然后对采集的浊度和声强信号进行标定, 只有通过标定后, 才能转化为悬沙浓度, 因此光学、声学仪器标定是准确研究悬沙浓度变化的关键环节<sup>[13-14]</sup>。经率定后的光学方法一般可达到较高的精确度, 但光学方法在测量过程中对悬沙粒径的变化非常敏感, 水动力变化带来观测区域悬沙粒径变化, 从而影响其观测精度, 且光学方法只能进出某个层面的现场观测, 要得到垂向水柱泥沙浓度分布, 必须使用一组设备, 由多个传感器分布在各个水层同步观测, 因此, 光学方法适用于现场点、线悬沙浓度观测<sup>[14]</sup>, 基本不用于施工期悬浮泥沙浓度变化观测。声学方法可用于单宽和断面悬沙颗粒物浓度观测和通量计算, 如吴加学等<sup>[15-16]</sup>在长江口北槽

抛泥过程中, 应用声学悬浮泥沙观测系统观测悬沙浓度的时空分布规律, 认为通过声学悬沙浓度定点和走航式观测, 可以初步确定不同潮型落潮流态情况下泥沙浓度的时空变化特征及其结构类型、抛泥泥沙输移对流场和悬沙浓度场的影响及抛泥泥沙输移扩散方向和范围。张华等<sup>[17]</sup>采用 ADCP 走航式测沙技术观测了连云港淤泥质海岸主航道疏浚土在抛泥作业过程中产生的悬浮物浓度, 分析其扩散运动规律, 认为将 ADCP 走航测沙技术运用于含沙量较小的连云港淤泥质海岸是可行的, 基本可以反映含沙量的平面分布特征, 高含沙量时 ADCP 推算值略低。因此, 声学方法大多应用于低浊度河口或海区, 对于高浊度河口还有待进一步深入<sup>[14]</sup>。遥感技术反演法是用卫星遥感影像数据反演悬浮物浓度, 可用于反演整个研究区域大面悬沙浓度的分布, 近几年应用较多, 但主要集中在自然状态下近岸海域、湖泊的悬浮物浓度遥感反演方法的探索和应用, 针对施工过程中悬浮泥沙浓度反演研究较少。郁焱兰等<sup>[18]</sup>基于现场采集水样数据和遥感影像数据, 建立了悬浮物含量反演模型, 实现污染物的扩散预测。宋南奇等<sup>[19]</sup>通过建立填海工程施工悬浮物反演模型, 将遥感技术监测结果与数值模拟计算结果相结合, 揭示填海施工造成的大范围悬浮物的扩散规律。遥感技术反演法的缺点是卫星过境的周期较长, 仅有表层数据, 反演的悬沙浓度相对误差可达 20%<sup>[20]</sup>。

现场观测成果相对可靠、客观, 但受观测费用、仪器设备和海上作业难度大、现场自然条件制约等影响, 现阶段国内对海洋工程施工引起的悬浮物扩散开展现场观测仍然较少。大多数学者采用数字模拟计算的方法研究海洋工程施工悬浮物扩散规律。

## 1.2 数值模拟法

张秀云等<sup>[21]</sup>、黄兰芳等<sup>[22]</sup>、吴松华<sup>[23]</sup>、顾恩慧等<sup>[24]</sup>、李晓燕等<sup>[25]</sup>模拟了海底输水管道和管线敷设产生的悬浮泥沙输移、扩散过程, 计算了悬浮泥沙的影响范围和程度, 认为管道或电缆敷设悬浮物影响范围仅在污染源附近海域, 悬浮物浓度可在较短时间内迅速降低, 实际影响范围可能远小于预测范围<sup>[21, 25]</sup>。黄惠明等<sup>[26]</sup>就防波堤地基爆破挤淤产生的悬浮泥沙在波浪、潮流共同作用下的输移扩散过程进行了数值模拟和探讨, 指出爆破挤淤对水域附近的生态环境有一定影响, 但影响范围并不大, 且持续的时间亦不长。娄海峰<sup>[27]</sup>通过数值模拟得到爆破

挤淤积 6 h 后悬浮泥沙浓度增量基本降至 10 mg/L 以下。彭辉等<sup>[28]</sup>、郭晓峰等<sup>[29]</sup>分别对岱山樱连门促淤围垦工程和湄洲湾峰尾围垦工程地基爆破挤淤引起的悬沙扩散进行了模拟,指出悬浮泥沙输移扩散运动与潮流运动密切相关,潮流的方向及水动力强度在一定程度上决定了悬浮泥沙的输移扩散方向及范围,爆破挤淤施工中产生的悬沙对周围的水环境虽然有一定的影响但持续时间并不长,且影响范围有限,在爆破 3 h 后基本降至 10 mg/L 以下,9 h 后悬沙影响基本消失。吴修广等<sup>[30]</sup>模拟了港池和航道疏浚过程中的悬浮泥沙扩散过程,认为更准确的预报需要根据挖泥船底部的浓度监测结果,应用 3D 模型进行计算。郭珊<sup>[31]</sup>采用二维悬沙输移扩散模型模拟了不同源强和不同水流条件下疏浚悬浮泥沙扩散情况。李铁军等<sup>[32]</sup>、匡华等<sup>[33]</sup>、陈义中等<sup>[34]</sup>、吴松华等<sup>[35]</sup>、曾小辉等<sup>[36]</sup>、Capello 等<sup>[37]</sup>、黄海龙等<sup>[38]</sup>也均采用了数值模拟的方法模拟了疏浚开挖过程产生的悬浮泥沙输移扩散规律及水深、潮型等水动力条件对悬浮泥沙扩散的影响。赖永辉等<sup>[39]</sup>、吴修广等<sup>[40]</sup>、孙毛明等<sup>[41]</sup>、李佳等<sup>[42]</sup>分别建立了平面二维悬浮泥沙输移扩散模型,模拟倾倒区抛泥产生的悬浮物质量浓度增量分布变化过程,指出大部分疏浚泥在重力作用下迅速沉积在倾倒区内,少量细颗粒泥沙悬浮在水中,在水中停留时间约 2 d<sup>[39]</sup>,为倾倒区选划提供了依据<sup>[40-41]</sup>。张世民等<sup>[43]</sup>采用三维数值模型模拟预测了冬夏季节不同背景潮流和风场作用下疏浚泥产生的悬沙输移规律,模型结果显示冬季泥沙输移扩散范围比夏季大,风对高浓度悬沙扩散有利,对悬沙输移的作用不明显。李思远等<sup>[44]</sup>模拟了有风和无风条件下疏浚泥倾倒后悬浮泥沙扩散分布,指出在重要的环境敏感目标附近开展倾倒、吹填、溢流、疏浚、铺设水下管道或电缆等会引起悬浮泥沙的海岸工程时,在海洋环境影响评价中进行悬浮泥沙扩散预测时必须考虑施工期不利风向和不利风速的影响。郭晓峰等<sup>[29]</sup>、陈小红等<sup>[45]</sup>分别对深圳湾填海工程和湄洲湾峰尾围垦工程抛石挤淤产生的悬浮物增量分布进行了模拟,指出抛石挤淤悬沙基本在围堤前沿 2 km 范围内运动。肖千璐<sup>[46]</sup>对防波堤不同抛石位置悬浮泥沙增量影响范围进行了对比,指出抛石位置选定需选择弱流区,同时还要考虑不同施工区域同时施工对悬浮泥沙增量的相互影响。匡良等<sup>[47]</sup>、郭婷婷<sup>[48]</sup>、崔雷等<sup>[49]</sup>对围填海通常吹填溢流产生的

悬浮泥沙扩散进行了数值模拟,指出吹填溢流产生的悬浮物局限于工程局部范围,大于 10 mg/L 悬浮物的最大影响距离不超过 2 km<sup>[47-49]</sup>。

## 2 悬浮物源强选取方法

悬浮物源强是悬浮物扩散数值模拟中的关键参数,选取合适的源强对分析海洋工程施工悬浮物扩散规律至关重要。

### 2.1 悬浮物源强类型及处理方式

悬浮物扩散方程的求解与污染源的存在形式密切相关<sup>[5]</sup>。目前海洋工程悬浮物源一般在空间上分为固定点源和移动点源,根据持续时间,又分为瞬时源和连续源。张秀云等<sup>[21]</sup>、黄兰芳等<sup>[22]</sup>、李晓燕等<sup>[25]</sup>在模拟电缆和管道铺设过程产生的悬浮物扩散时,均采用连续固定点源排放的方式处理,顾恩慧等<sup>[24]</sup>根据海底电缆铺设作业的施工特点采用了移动点源的方式对悬浮物进行模拟,吴松华<sup>[23]</sup>分别采用了移动点源和固定点源的处理方式对比水底管道铺设施工引起的悬浮物扩散情况,指出与固定点源处理方式相比,源强采用移动点源的处理方式更贴切实际。黄惠明等<sup>[26]</sup>、娄海峰<sup>[27]</sup>、彭辉等<sup>[28]</sup>、郭晓峰等<sup>[29]</sup>在爆破挤淤产生悬浮物输移扩散模拟中,将因爆破产生的悬浮物概化为瞬时固定源。吴修广等<sup>[30]</sup>、郭珊<sup>[31]</sup>、匡华等<sup>[33]</sup>、吴松华等<sup>[35]</sup>、黄海龙等<sup>[38]</sup>将疏浚时产生的悬浮物采用连续固定源排放的方式处理,李铁军等<sup>[32]</sup>、陈义中等<sup>[34]</sup>、曾小辉等<sup>[36]</sup>采用移动点源的方式模拟航道开挖施工中产生的悬浮物。赖永辉等<sup>[39]</sup>、吴修广等<sup>[40]</sup>、孙毛明等<sup>[41]</sup>、张世民等<sup>[43]</sup>、李思远等<sup>[44]</sup>在模拟抛泥引起的悬沙输移时采用固定点源的方式模拟,李佳等<sup>[42]</sup>在疏浚物抛卸模拟中引入了随机函数,用随机序列来确定悬浮物源在计算网格中发生的节点位置。郭晓峰等<sup>[29]</sup>、陈小红等<sup>[45]</sup>、肖千璐<sup>[46]</sup>在模拟抛石挤淤悬浮泥沙扩散时选择按连续固定源计算,匡良等<sup>[47]</sup>、郭婷婷<sup>[48]</sup>、崔雷等<sup>[49]</sup>在模拟吹填溢流时将每个源点视为连续固定源。

以上研究表明,根据工程类型和施工特点的不同,在数值模拟中对悬浮物源强的处理方式也不同。电缆管道敷设及航道开挖施工悬浮物扩散数值模拟一般采用移动点源的模拟方式更佳<sup>[23]</sup>,但移动点源模拟方式需要确定施工的起始时刻或潮型,在实际工作中,由于施工时间不确定,为保守考虑,多采用



连续固定源排放的方式进行模拟,该方法虽然与实际过程有所偏差,但能反映最不利影响情况;爆破挤淤由于爆破点一般固定在几个点,因此模拟爆破挤淤产生的悬浮泥沙扩时一般采用瞬时固定点源的方式进行模拟;疏浚一般需要根据施工方案确定,航道疏浚一般按移动点源计算,小范围疏浚一般按固定点源计算;抛泥时由于其时间较短且一般在固定点位抛卸,多采用瞬时固定点源的方式进行模拟;抛石挤淤及围填海溢流由于产生的悬浮泥沙的位置固定,一般选择连续固定点源的处理方式进行计算。

## 2.2 悬浮物源强大小选取方法

现阶段国内学者对海洋工程施工引起的悬浮物源强选取方法主要有现场观测法、经验公式法和类比分析法。

戴明新<sup>[8]</sup>通过在天津港的大量现场实测资料推算得出生产率为 500 m<sup>3</sup>/h 的链斗式挖泥船作业时的悬浮泥沙源强为 6.23 kg/s, 1 600 m<sup>3</sup>/h 绞吸式挖泥船作业时的悬浮泥沙源强为 2.25 kg/s。陈杰等<sup>[7]</sup>通过开展现场观测,确定了围填海工程溢流口悬浮物源强最高可达 3 796 kg/s, 平均为 617~1 137 kg/s。陈杰等<sup>[11]</sup>通过生产率为 500 m<sup>3</sup>/h 的链斗式挖泥船疏浚现场观测,结合泥沙对流扩散方程,推算得到挖泥船正常作业时悬浮物源强约 6.23 kg/s,与戴明新<sup>[8]</sup>的研究结果一致。

由于现场观测所需人力物力较大,国内针对施工引起的悬浮物扩散现场观测较为少见,多数学者采用经验公式的方法确定悬浮物源强<sup>[5]</sup>。不同施工方式产生的悬浮物源强计算公式不同,但所有经验公式均涉及到一个重要参数:悬浮物起悬比,即工程中悬沙量占泥沙总量的百分比<sup>[5]</sup>。管线埋设产生的悬沙泥沙源强由埋设横截面积、埋设速度、沉积物干容重和起悬比相乘计算得到,起悬比一般均采用 10%~30%<sup>[22-25]</sup>,吴松华<sup>[23]</sup>、李晓燕等<sup>[25]</sup>取悬沙源强为 1.89~8.32 kg/s,黄兰芳等<sup>[22]</sup>、顾恩慧等<sup>[24]</sup>取电缆敷设源强为 37.5~123.86 kg/s。爆破挤淤产生的瞬时悬浮物源强采用每次爆破挤淤的泥量与起悬比相乘计算得到,起悬比一般均采用 5%~8%<sup>[26-29]</sup>,不同爆破量产生的悬浮泥沙源强差异较大,彭辉等<sup>[28]</sup>在对爆破挤淤的模拟中根据单次爆破挤淤的置换量及起悬比得到各爆破点的悬沙源强为 0.97~2.12 kg/s,郭晓峰等<sup>[29]</sup>、李照宇等<sup>[50]</sup>得到各爆破点的悬沙源强分别为 5 170 kg/s 和 1 250 kg/s。疏浚物抛卸悬浮物源强采用单位时间抛

卸量与起悬比相乘计算得到,起悬比一般取 5%~10%<sup>[39-44]</sup>,倾倒体积在 3 150~12 000 m<sup>3</sup>时,抛泥源强在 472.5~2 000 kg/s<sup>[39-44]</sup>。抛石挤淤悬浮泥沙源强计算时一般认为淤泥中粒径小于 0.05 mm 的颗粒全部悬浮,源强量值与抛石挤淤入海淤泥量(一般按挤淤量的 5%计)、淤泥中悬浮泥沙颗粒所占百分比和颗粒物湿密度成正相关,与淤泥天然含水率成负相关,泥沙源强在 1.39~4.11 kg/s<sup>[29, 45-46]</sup>。

疏浚悬浮泥沙源强多采用类比分析得到。通过类比戴明新<sup>[5-6]</sup>的现场监测结果,8 m<sup>3</sup>抓斗船源强一般取 0.96~5.58 kg/s<sup>[33-34, 51-54]</sup>,13 m<sup>3</sup>抓斗船源强稍大,在 9 kg/s 左右<sup>[34]</sup>;1 450 m<sup>3</sup>/h 绞吸式挖泥船泥沙源强一般取 2.22~3.5 kg/s<sup>[33, 55]</sup>,1 500 m<sup>3</sup>/h 绞吸式挖泥船源强一般取 2.15~2.25 kg/s<sup>[56-57]</sup>,1 500 m<sup>3</sup>/h 耙吸式挖泥船源强一般取 3.83~5 kg/s<sup>[32, 55]</sup>,1 600 m<sup>3</sup>/h 绞吸式挖泥船产生源强一般取 2.25~3.75 kg/s<sup>[31-32, 35]</sup>,3 000~4 500 m<sup>3</sup>/h 的耙吸式挖泥船源强一般取 7.5~12.5 kg/s<sup>[31, 36]</sup>。溢流悬浮泥沙源强一般可根据溢流口的入海悬沙浓度乘以泥沙溢流速度估算得到,入海悬沙浓度一般按 1 000 mg/L 估算<sup>[49, 55-57]</sup>,也有按 1 500 mg/L 估算<sup>[48]</sup>,吹填溢流源强约为 0.24~2.56 kg/s<sup>[48-49, 55-57]</sup>。

综上所述,在源强的选取方法上,目前对于挖泥船疏浚悬浮泥沙源强研究具有现场实测数据基础,因此疏浚工程悬浮泥沙输移数值模拟研究中悬浮泥沙源强的选取建议采用类比分析法,即类比相同或类似型号疏浚船的实测悬浮泥沙源强数据得到;吹填溢流悬浮泥沙源强可采用估算法,但缺乏更多的入海悬沙浓度现场实测数据,对溢流口悬浮泥沙浓度争议较大。管道或管线埋设、爆破挤淤、疏浚物抛卸、抛石挤淤等施工过程悬浮泥沙源强选取时建议采用经验公式计算法,根据不同的施工类型和强度选取不同的起悬比,其中管道或管线埋设起悬比可采用 10%~30%,爆破挤淤起悬比可采用 5%~8%,疏浚物抛卸起悬比可采用 5%~10%,抛石挤淤起悬比可采用 5%,实际工作中可根据施工海域流速、粒径大小视情况调整。

在源强的取值大小上,基本可划分为 3 个等级:吹填溢流、抛石挤淤、小尺度爆破、8 m<sup>3</sup>以下抓斗式挖泥船、1 500 m<sup>3</sup>/h 以下耙吸式挖泥船、1 600 m<sup>3</sup>/h 以下绞吸式挖泥船等小型强度作业,源强在 0.97~5 kg/s 之间;管道或管线埋设、8 m<sup>3</sup>以上抓斗式挖泥船、1 500 m<sup>3</sup>/h 以上耙吸式挖泥船、1 600 m<sup>3</sup>/h 以上绞吸式挖泥船等中型强度作业,源强一般在 7.16~12.5 kg/s 之间,若管道

或管线埋设区域沉积物粒径较细,流速较大,悬浮泥沙源强可达到 37.5~123.86 kg/s;疏浚物抛卸、大尺度爆破等大型强度作业,源强在 472.5~5 100 kg/s 之间。

### 3 结论

上述分析表明,现阶段国内外对海洋工程施工引起的悬浮物扩散开展现场观测较为少见,施工悬浮泥沙扩散规律研究多采用数值模拟法,其中数值模拟中源强的选取多采用经验公式计算,但对公式中涉及的重要参数尚缺乏现场观测数据支撑,未来可丰富此方面研究成果,开展施工悬浮泥沙浓度观测,为施工悬浮泥沙源强计算和施工悬浮泥沙扩散研究提供理论依据。在海洋工程施工中,应结合实际施工情况,参考不同施工类型、强度及施工机械对悬浮泥沙源强进行合理设置,以正确评估悬浮泥沙对海洋环境的影响程度。

#### 参考文献:

[1] 徐兆礼,李鸣,高倩,等. 洋山工程影响海洋环境关键因子的分析[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(5): 617-622.  
XU Zhaoli, LI Ming, GAO Qian, et al. Analysis on key factors of influence of Yangshan project on marine environment[J]. Marine Environment Science, 2010, 29(5): 617-622.

[2] 白雪梅,徐兆礼. 底泥悬浮物对水生生物的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2000, 9(1): 65-68.  
BAI Xuemei, XU Zhaoli. The effects of suspended sediment on aquatic organisms[J]. Journal Of Shanghai Fisheries University, 2000, 9(1): 65-68.

[3] 宋伦,杨国军,王年斌,等. 悬浮物对海洋生物生态环境影响[J]. 水产科学, 2012, 31(7): 444-448.  
SONG Lun, YANG Guojun, WANG Nianbin et al. Effects of suspended matter on marine bio-ecology[J]. Fisheries Science, 2012, 31(7): 444-448.

[4] Mott MACDONALD. Contaminated spoil management study, final report, Volume 1, for EPD[R]. 1991.

[5] 王时悦. 海岸工程中悬浮泥沙源强选取研究概述[J]. 科技资讯, 2016, 74(6): 74-76.  
WANG Shiyue. Research overview on the selection of suspended sediment source strength in coastal engineering[J]. Science & Technology Information, 2016, 74(6): 74-76.

[6] 曾建军. 挖泥船疏浚悬浮物源强及环境影响对比分析[J]. 环境保护与循环经济, 2016(11): 40-46.  
ZENG Jianjun. Comparative analysis of dredging suspended matter source strength and environmental impact[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2016(11): 40-46.

[7] 陈杰,蒋昌波,张绍华,等. 围海造陆工程泄水口悬浮物扩散规律分析[J]. 海洋科学, 2015, 39(8): 58-62.  
CHEN Jie, JIANG Changbo, ZHANG Shaohua, et al. Study of suspended solids diffusion from drain opening of land reclamation project[J]. Marine Sciences, 2015, 39(8): 58-62.

[8] 戴明新. 挖泥船疏浚作业对环境影响的试验研究[J]. 交通环保, 1997(4): 7-9.  
DAI Minxin. Experimental study on environmental impact of dredging operation[J]. Environmental Protection In Transportation, 1997(4): 7-9.

[9] 何东海,何琴燕,吴光荣,等. 苍南海域疏浚物倾倒悬浮物扩散特征现场试验分析[J]. 海洋工程, 2013, 31(3): 101-106.  
HE Donghai, HE Qinyan, WU Guangrong, et al. Probing on the dispersion character of dredged material after dumping in sea area around Cangnan[J]. The Ocean Engineering, 2013, 31(3): 101-106.

[10] 张绍华,蒋昌波,陈杰,等. 挖泥船疏浚施工引起的悬浮物扩散现场观测研究[J]. 泥沙研究, 2014(4): 44-48.  
ZHANG Shaohua, JIANG Changbo, CHEN Jie, et al. Field observation and study of turbidity plume induced by dredger[J]. Journal of Sediment Research. 2014(4): 44-48.

[11] 陈杰,蒋昌波,张绍华,等. 链斗式挖泥船疏浚引起的悬浮物扩散规律[J]. 交通科学与工程, 2014, 30(2): 55-59.  
CHEN Jie, JIANG Changbo, ZHANG Shaohua, et al. Suspended solids diffusion induced by bucket dredger[J]. Journal of Transport Science and Engineering. 2014, 30(2): 55-59.

[12] 郭玉臣,石志洲,王庆业,等. 基于现场实验结果对倾倒泥沙扩散数值模型参数率定研究[J]. 海洋通报, 2016, 35(2): 170-177.  
GUO Yuchen, SHI Zhizhou, WANG Qingye, et al. Parameter determination of the numerical model for dumping sediment transport based on the field experimental results[J]. Marine Science Bulletin, 2016, 35(2): 170-177.

[13] 张文祥,杨世伦. OBS 浊度标定与悬沙浓度误差分析[J]. 海洋技术, 2008, 27(4): 5-8.  
ZHANG Wenxiang, YANG Shilun. Turbidity calibration of OBS and errors analysis of suspended sediment concentration[J]. Ocean Technology, 2008, 27(4): 5-8.

[14] 张文祥,罗向欣,杨世伦. ADP 与 OBS 观测悬沙浓度实验对比研究[J]. 泥沙研究, 2010(5): 59-65.  
ZHANG Wenxiang, LUO Xiangxin, YANG Shilun. Comparison between measurements of suspended sediment concentration using ADP and OBS[J]. Journal of Sediment Research, 2010(5): 59-65.

[15] 吴加学,张叔英,任来法. 长江口北槽抛泥流速和悬沙

- 浓度时空分布观测[J]. 海洋学报, 2003, 25(4): 91-103.  
WU Jiaxue, ZHANG Shuying, REN Laifa. Field observations of current and suspended sediment concentration during sediment disposal in the Changjiang(Yangtze) Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2003, 25(4): 91-103.
- [16] 吴加学, 张叔英, 任来法. 长江河口北槽抛泥作业状态下的悬沙浓度分布与扩散过程[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(1): 83-93.  
WU Jiaxue, ZHANG Shuying, REN Laifa. Suspended sediment concentration profiles and dispersion patterns under sediment disposal conditions in the Changjiang River Estuary[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2003, 34(1): 83-93.
- [17] 张华, 马兴华, 谢锐, 等. 连云港港 30 万吨级航道工程抛泥悬浮物扩散观测研究[J]. 水运工程, 2012(1): 111-115.  
ZHANG Hua, MA Xinghua, XIE Rui, et al. Survey and study on diffusion of suspended spoil in 300000 DWT channel project of Lianyungang harbor[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(1): 111-115.
- [18] 郁艸兰, 王诺. 大型填海工程悬浮物污染监测方法[J]. 大连海事大学学报, 2015, 41(2): 103-110.  
YU Tiaolan, WANG Nuo. Monitoring methods of suspended particulate matter pollution in large-scale reclamation[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2015, 41(2): 103-110.
- [19] 宋南奇, 王诺, 吴暖. 基于数值模拟与卫星遥感的填海施工悬浮物监测——以大连海上人工岛机场建设为背景[J]. 海洋通报, 2018, 37(2): 83-90.  
SONG Nanqi, WANG Nuo, WU Nuan. Monitoring of suspended particulate matter diffusion during reclamation construction based on numerical model and satellite remote sensing-Taking the Dalian Offshore Airport as the background[J]. Marine Science Bulletin, 2018, 37(2): 83-90.
- [20] 傅克付, 荒川久幸. 悬沙水体不同波段反射比的分布特征及悬沙量估算实验研究[J]. 海洋学报, 1999, 21(3): 134-140.  
FU Kefu, ARAKAWA Hisayuki. Distribution feature of reflectance of water body containing suspended particles in different wave lengths and experimental study on estimating amount of suspended particles[J]. Haiyang Xuebao, 1999, 21(3): 134-140.
- [21] 张秀云, 焦亦平, 张凤林. 大长山岛海底输水管道工程对海域环境影响的初步探讨[J]. 海洋通报, 1998, 17(4): 63-69.  
ZHANG Xiuyun, JIAO Yiping, ZHANG Fengli. Preliminary study on the environmental influence of under sea water pipeline engineering crossing Dachangshan Island[J]. Marine Science Bulletin, 1998, 17(4): 63-69.
- [22] 黄兰芳, 孙志林. 海底输水管道敷设过程中悬浮泥沙对海洋环境影响的数值研究[J]. 海岸工程, 2011, 30(1): 13-21.  
HUANG Lanfang, SUN Zhilin. Numerical simulation to study suspended silt impact on marine environments in submarine pipeline-laying process[J]. Coastal Engineering, 2011, 30(1): 13-21.
- [23] 吴松华. 瓯江北口水底管线铺设开挖引起的悬浮物输移数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.  
WU Songhua. Numerical simulation of suspended sediment transport caused by excavation of submarine pipeline laying in Oujiang River north entrance[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [24] 顾恩慧, 彭婷容. 海底电缆铺设对悬浮泥沙影响的预测研究[J]. 港工技术, 2012, 49(5): 5-7.  
GU Enhui, PENG Kuarong. Prediction study on suspended sediment impacted by submarine cable laying construction[J]. Port Engineering Technology, 2012, 49(5): 5-7.
- [25] 李晓燕, 章宏伟, 倪玮. 江苏射阳风电场电缆敷设引起悬沙扩散影响预测[J]. 人民长江, 2015, 46(18): 39-42.  
LI Xiaoyan, ZHANG Hongwei, NI Wei. Prediction of impact of submarine cable laying on suspended sediment diffusion at Sheyang Wind Farm in Jiangsu Province[J]. Yangtze River, 2015, 46(18): 39-42.
- [26] 黄惠明, 王义刚, 孙思源, 等. 爆破挤淤产生的悬浮物输移扩散模拟研究[J]. 海洋工程, 2010, 28(1): 70-75.  
HUANG Huiming, WANG Yigang, SUN Siyuan, et al. Study on transportation of suspended sediment caused by explosion and compaction[J]. The Ocean Engineering, 2010, 28(1): 70-75.
- [27] 娄海峰. 爆破挤淤产生的悬浮物在潮流作用下的输移扩散研究[J]. 浙江水利科技, 2010, (5): 9-12.  
LOU Haifeng. Current-affected transport and diffusion of suspended sediment resulting from mud displacement by blasting[J]. Zhejiang Hydrotechnics. 2010, (5): 9-12.
- [28] 彭辉, 袁金雄. 岱山樱连门促淤围垦工程围堤地基爆破挤淤悬浮泥沙输移扩散模拟研究[J]. 水运工程, 2012(8): 16-21.  
PENG Hui, YUAN Jinxiong. Transport and diffusion of suspended sediment caused by mud displacement by blasting[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(8): 16-21.
- [29] 郭晓峰, 王翠, 陈楚汉, 等. 涓洲湾峰尾围垦工程施工期间海水悬浮泥沙输移扩散的数值模拟[J]. 应用海洋学学报, 2014, 33(1): 125-132.  
GUO Xiaofeng, WANG Cui, CHEN Chuhan, et al. Numerical simulation of the transport diffusion of suspended matter during the construction of Fengwei reclamation project at Meizhou Bay[J]. Journal of Applied



- Oceanography, 2014, 33(1): 125-132.
- [30] 吴修广, 季大闰, 史英标, 等. 港池和航道疏浚过程中悬浮泥沙扩散输移的数值模拟[J]. 水运工程, 2006(8): 87-91.  
WU Xiuguang, JI Darun, SHI Yingbiao, et al. Numerical simulation of suspended sediment's transportation during dredging of harbor basin and channel[J]. Port & Waterway Engineering, 2006(8): 87-91.
- [31] 郭珊. 疏浚施工对海洋生态环境的影响及防治对策研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2006.  
GUO Shan. The influence on marine ecologic environment by dredging and protection countermeasures[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2006.
- [32] 李铁军, 孙英兰, 刘伟峰, 等. 胶州湾泛亚码头疏浚方案优选及悬浮物影响预测[J]. 海洋湖沼通报, 2007, 23(4): 144-150.  
LI Tiejun, SUN Yinglan, LIU Weifeng, et al. Optimized scheme and forecasting impact of suspended particulate matter of dredging near Fanya Dock in Jiaozhou Bay[J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 2007, 23(4): 144-150.
- [33] 匡华, 匡良. ECOMSED 数学模型研究悬浮物对海洋环境影响[J]. 四川理工学院学报(自科版), 2008, 21(2): 47-50.  
KUANG Hua, KUANG Liang. Study on the prediction of the environmental effects through ECOMSED math model[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering(Natural Science Edition), 2008, 21(2): 47-50.
- [34] 陈义中, 林卫青. 上海外高桥码头邻近水域泥沙疏浚影响数值模拟研究[J]. 上海环境科学, 2009, 28(3): 101-105.  
CHEN Yizhong, LIN Guiqing. Numerical simulation study on the impact of silt dredging in the waters around Waigaoqiao Dock[J]. Shanghai Environment Science, 2009, 28(3): 101-105.
- [35] 吴松华, 姚炎明, 周大成, 等. 开挖过程中悬浮泥沙扩散输移的数值模拟[J]. 港工技术, 2011, 48(2): 1-4.  
WU Songhua, YAO Yanming, ZHOU Dacheng, et al. Numerical simulation of suspended sediment diffusion and movement during excavation[J]. Port Engineering Technology, 2011, 48(2): 1-4.
- [36] 曾小辉, 吴迪, 肖笋. 施工产生的悬浮泥沙对附近海域水质影响的定量预测分析[J]. 水运工程, 2013(9): 41-44.  
ZENG Xiaohui, WU Di, XIAO Sun. Quantitative analysis and prediction of impact from suspended sediment produced during construction on inshore water quality[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(9): 41-44.
- [37] CAPELLO M, CUTRONEO L, FERRANTI M P, et al. Mathematical simulation of the suspended solids diffusion during dredging operations on the continental shelf off the coast of Lazio (Central Tyrrhenian Sea, Italy)[J]. Ocean Engineering, 2013, 72: 140-148.
- [38] 黄海龙, 王震. 水下开挖施工产生的悬浮泥沙扩散数值分析[J]. 水运工程, 2015(7): 25-35.  
HUANG Hailong, WANG Zhen. Numerical analysis of suspended sediment diffusion caused by underwater excavation[J]. Port & Waterway Engineering, 2015(7): 25-35.
- [39] 赖永辉, 谈广鸣, 王军. 深圳港西部港区进出港航道工程疏浚泥水抛泥沙输移扩散规律研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006, 39(3): 41-45.  
LAI Yonghui, TAN Guangming, WANG Jun. Study on transmitting and spreading rules of dredging sediment of Shenzhen Western Port channel[J]. Engineering Journal of Wuhan University(Engineering Science), 2006, 39(3): 41-45.
- [40] 吴修广, 杨润伟, 史英标, 等. 外海抛泥过程中悬浮泥沙扩散输移的数值模拟[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(3): 236-241.  
WU Guangxiu, YANG Runwei, SHI Yingbiao, et al. Numerical simulation of suspend sediment transportation during disposing of spoil off sea[J]. Marine Environmental Science, 2008, 27(3): 236-241.
- [41] 孙毛明, 吴修广, 倪勇强, 等. 疏浚土倾倒后悬浮泥沙扩散输移的数值模拟[J]. 海洋学研究, 2009, 27(3): 22-30.  
SUN Maoming, WU Xiuguang, NI Yong, et al. Numerical simulation of the dispersion and transportation of suspended sediment from dredged soil matter[J]. Journal of Marine Sciences, 2009, 27(3): 22-30.
- [42] 李佳, 姚炎明, 孙志林, 等. 大型海洋倾倒区悬浮物迁移扩散的数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(7): 1319-1328.  
LI Jia, YAO Yanming, SUN Zhilin, et al. Numerical simulation of transport and dispersion of suspended matter due to dredged sediment disposal into large marine dumping area[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(7): 1319-1328.
- [43] 张世民, 陈德文, 邓兆青. 东碇倾倒区疏浚泥悬沙输移和海床冲淤数值模拟[J]. 海洋通报, 2014, 33(5): 541-551.  
ZHANG Shimin, CHEN Dewen, DENG Zhaoqing. Numerical simulation of dredged sediment transport and erosion in Dongding ocean dumping area outside the Xiamen Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(5): 541-551.
- [44] 李思远, 王义刚, 黄惠明, 等. 风对悬浮泥沙扩散特性影响数模研究[J]. 水道港口, 2015, 36(4): 297-301.  
LI Siyuan, WANG Yigang, HUANG Huiming, et al. Influence of wind on dispersion of suspended sediment[J].

- Journal of Waterway and Harbor, 2015, 36(4): 297-301.
- [45] 陈小红, 涂新军. 深圳湾游艇项目悬浮物影响预测与分析[J]. 海洋环境科学, 2000, 19(1): 48-51.  
CHEN Xiaohong, TU Xinjun. Prediction and analysis on the effects of suspended solids of a yacht club project at Shenzhen Bay[J]. Marine Environmental Science, 2000, 19(1): 48-51.
- [46] 肖千璐. 防波堤抛石过程中悬浮泥沙扩散输移的数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2015, 48(1): 1-6.  
XIAO Qianlu. Numerical simulation of dispersion and transportation of suspended sediment due to bed ripping of breakwater[J]. Engineering Journal of Wuhan University(Engineering Science), 2015, 48(1): 1-6.
- [47] 匡良, 娄安刚, 杨毅, 等. 海阳港码头扩建工程悬浮物对海洋环境影响预测研究[J]. 中国水运, 2007, 7(2): 67-70.  
KUANG Liang, LOU Angang, YANG Yi, et al. Study on the prediction of the environmental effects of the suspended particles caused by the Haiyang Port's expanding project[J]. China Water Transport, 2007, 7(2): 67-70.
- [48] 郭婷婷. 深圳湾滨海休闲带海洋工程对海洋环境影响的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.  
GUO Tingting. The research of the influences on marine environment by the marine engineering of the leisure coast zone of Shenzhen Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [49] 崔雷, 孙钦帮, 姜恒志, 等. 填海工程悬浮物对海域环境影响的数值模拟研究——以中国海监唐山维权执法基地建设工程为例[J]. 人民珠江, 2017, 38(11): 15-19.  
CUI Lei, SUN Qinbang, JIANG Hengzhi, et al. Numerical simulation study on environmental effects of suspended sediment in reclamation projects—taking the rights base project of Tangshan maritime safety administration as an example[J]. Pearl River, 2017, 38(11): 15-19.
- [50] 李照宇, 王文渊, 郭子坚, 等. 爆破挤淤施工中近岸水生生物损失率分布及影响研究[J]. 水道港口, 2017, 38(1): 84-88.  
LI Zhaoyu, WANG Wenyuan, GUO Zijian et al. Study on loss of biomass using the method of squeezing silt by blasting[J]. Journal of Waterway and Harbor. 2017, 38(1): 84-88.
- [51] Maunsell Consultants Asia LTD. Dredging works for proposed cruise Terminal at Kai Tak environmental impact assessment report[R]. 2009. <http://www.epd.gov.hk>.
- [52] Maunsell Consultants Asia LTD. Installation of submarine gas pipelines and associated facilities from To Kwa Wan to North Point for Former Kai Tak Airport Development Consultancy Services for feasibility study and detailed design environmental impact assessment report[R]. 2010. <http://www.epd.gov.hk>.
- [53] Maunsell Consultants Asia LTD. Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge(HZMB) Hong Kong Link Road (HKLR) and Hong Kong Boundary Crossing Facilities (HKBCF) environmental impact assessment report[R]. 2011. <http://www.epd.gov.hk>.
- [54] Maunsell Consultants Asia LTD. Providing Sufficient Water Depth for Kwai Tsing Container Bsdin its Approach Channel Environmental Impact Assessment Report[R]. 2012. <http://www.epd.gov.hk>.
- [55] 李褪来, 高祥宇, 杨红, 等. 陈家港电厂航道疏浚悬浮物扩散数学模型研究[C]. 第十三届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 南京: 中国海洋工程学会, 2007: 446-454.  
LI Tilai, GAO Xiangyu, YANG Hong, et al. Study on the diffusion mathematical Model of dredging suspended solids in Waterway of Chenjiagang Power Plant Channel[C]. Proceedings of the 13th China Marine (Coastal) Engineering Academic Symposium. Nanjing: China Ocean Engineering Society, 2007: 446-454.
- [56] 王逸晨. 码头附近潮流场及工程泥沙问题的数值模拟[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.  
WANG Yichen. Numerical simulation of the tidal current and engineering sediment in terminal domain[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005.
- [57] 车宏宇. 营口港扩建工程悬浮物对海域环境影响分析[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(2): 48-50.  
CHE Hongyu. Impact of suspended substance from the expansion engineering of Yingkou port on oceanic environment[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2006, 22(2): 48-50.



# Research overview on source and diffusion of suspended solids in ocean engineering construction

ZHANG Qin

(Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

**Received:** Sep. 13, 2020

**Key words:** ocean engineering; suspended solids; diffusion; sediment source

**Abstract:** There is an increasing attention focusing on ocean engineering related to environmental and ecological problems such as blasting, pipeline laying, dredging, dumping of dredged materials, rock dumping, and blow filling, among others, which will lead to the suspension of sediments and increase of the concentration of suspended sediments in the surrounding sea area. In this paper, the methods to measure the concentration diffusion of suspended sediment in domestic construction and the methods to select the source strength of suspended sediment in numerical models are summarized, which provide reference and basis for the study of suspended sediment diffusion in the process of marine engineering construction.

(本文编辑: 赵卫红)