



# 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

彭辉, 袁金雄

(浙江大学港口、海岸与近海工程研究所, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 爆破挤淤填石法作为地基处理的一种常用方法, 广泛应用于沿海养殖围堤、围海造地、护岸以及防波堤等水工工程的淤泥质软土地基处理。在对岱山樱连门促淤围垦工程围堤地基爆破挤淤处理产生的悬浮泥沙输移扩散进行模拟的基础上, 分析了爆破挤淤对周围海域的影响。研究表明, 爆破挤淤所产生的悬浮泥沙的输移扩散受潮流的影响较大, 其输移扩散的范围及方向很大程度上取决于爆破后工程区域附近潮流的水动力强度及方向。爆破挤淤后产生的悬浮泥沙浓度增量由于扩散和沉降作用迅速减小, 在爆破3 h后基本降至10 mg/L以下。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。

**关键词:** 爆破挤淤; 悬浮泥沙; 输移扩散; 岱山

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)08-0016-06

## Transport and diffusion of suspended sediment caused by mud displacement by blasting

PENG Hui, YUAN Jin-xiong

(Research Institute of Harbor Coastal and Offshore Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** In recent years, the toe-shooting method is widely applied to handling soft foundation of many offshore engineering projects such as building breakwaters, shore protections and reclamation of land from the sea as a commonly method. We analyze the impact on adjacent waters resulting from the blasting in the foundation of simulating the transport and diffusion process of the suspended sediment caused by toe-shooting method applied to the promotion and reclamation project located in Daishan. The result shows that the transport and diffusion of suspended sediment are predominantly affected by the current movement, the direction and scope of the former are determined to a great extent by the direction and dynamics of the latter. The content of suspended sediment rapidly decreases as a result of diffusion and silting. The content increment could basically reach the level below 10 mg/L within 3 hours after the blasting. The blasting has some impact on water environment of neighboring waters, but the duration is limited and the incidence is limited too.

**Key words:** mud displacement by blasting; suspended sediment; transport and diffusion; Daishan

近年来, 爆破挤淤填石法作为地基处理的一种常用方法, 广泛应用于沿海养殖围堤、围海造地、护岸以及防波堤等水工工程的淤泥质软土地基处理。施工时通过引爆炸药将其周围介质推向四周形成爆炸空腔, 当爆炸产物压力卸载后, 在

重力的作用下堆石体连同底部淤泥回落到空腔中形成“石舌”达到置换淤泥的目的<sup>[1-2]</sup>。被置换的淤泥在爆破冲击波、水流等外部因素的作用下极易悬浮于水中, 加大周围水体中悬沙的浓度, 并随着水流输移扩散, 从而影响周围的水质, 威胁海

收稿日期: 2012-03-05

作者简介: 彭辉(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事河口海岸动力环境及数值模拟。

洋生物的生存<sup>[3]</sup>。因此研究爆破挤淤施工过程中产生的悬浮泥沙在水流中的输移扩散过程, 分析其对生态环境的影响具有重要意义。岱山樱连门促淤围垦工程围堤地基处理采用爆破挤淤填石法, 工程位置如图1所示, 本文对该围堤处爆破挤淤产生的悬浮泥沙输移扩散过程进行数值模拟, 并分析了不同时刻进行爆破挤淤产生的悬浮泥沙输移扩散对附近水域的影响。

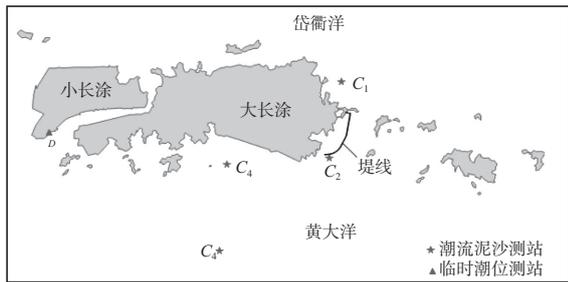


图1 工程及水文测站地理位置

## 1 数学模型

### 1.1 基本方程

1) 平面二维浅水潮波连续方程和运动方程<sup>[4]</sup>:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial U(h+z)}{\partial x} + \frac{\partial V(h+z)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{1}{\rho(h+z)} \tau_{bx} = A_x \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{1}{\rho(h+z)} \tau_{by} = A_y \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

2) 垂线平均的二维不平衡输沙方程(增量计算):

$$\frac{\partial HS}{\partial t} + \frac{\partial HuS}{\partial x} + \frac{\partial HvS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( v_x H \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_y H \frac{\partial S}{\partial y} \right) - \alpha \omega S + \frac{S_s}{A_s} \quad (4)$$

式中:  $z$ 为潮位(m);  $t$ 为时间(s);  $U, V$ 分别为垂线平均流速在 $x, y$ 方向上的分量(m/s);  $h$ 为静水深(m);  $f$ 为柯氏系数,  $f=2w \sin \varphi$  ( $w$ 为地转角速度,  $\varphi$ 为纬度);  $g$ 为重力加速度(m/s<sup>2</sup>);  $\tau_{bx}, \tau_{by}$ 分别为 $x, y$ 方向

底床阻力,  $(\tau_{bx}, \tau_{by}) = \frac{\rho g(U, V) \sqrt{U^2 + V^2}}{c^2}$ ;  $c$ 为谢才系数,  $c = \frac{1}{n} H^{\frac{1}{6}}$ ,  $n$ 为糙率系数,  $H=h+z$ ;  $A_x, A_y$ 为水平涡动黏滞系数(m<sup>2</sup>/s)。  $S$ 为垂线平均含沙量;  $S_s$ 为悬沙源强;  $A_s$ 为排放点的流体微团面积, 在数值计算中取节点的质心域面积。

### 1.2 离散化处理

对式(1)~(3)应用加权余数法伽辽金逼近(其中二次项应用分部积分), 且各时间导数取前差近似, 整理后得到各变量的显式数值解:

$$z_j^{n+1} = z_j^n - \Delta t [(\overline{\beta H v^n} + \overline{\gamma H u^n}) / 2\lambda] \quad (5)$$

$$u_j^{n+1} = u_j^n - \Delta t [u_j^n (\overline{\beta u} / 2\lambda)^n \downarrow_{T_{xj}} + v_j^n (\overline{\gamma u} / 2\lambda)^n \downarrow_{T_{yj}} + g \frac{\overline{\beta z}^{n+1}}{2\lambda} - f v_j^n + \frac{g}{C_z^2} \left( \frac{u^n \sqrt{u_n^2 + v_n^2}}{H^{n+1}} \right)_j + (\varepsilon_x \overline{\beta \beta u} + \varepsilon_y \overline{\gamma \gamma u})_j / 4\lambda^2] \quad (6)$$

$$v_j^{n+1} = v_j^n - \Delta t [u_j^n (\overline{\beta v} / 2\lambda)^n \downarrow_{T_{xj}} + v_j^n (\overline{\gamma v} / 2\lambda)^n \downarrow_{T_{yj}} + g \frac{\overline{\gamma z}^{n+1}}{2\lambda} + f u_j^n + \frac{g}{C_z^2} \left( \frac{v^n \sqrt{u_n^2 + v_n^2}}{H^{n+1}} \right)_j + (\varepsilon_x \overline{\beta \beta v} + \varepsilon_y \overline{\gamma \gamma v})_j / 4\lambda^2] \quad (7)$$

式中:  $\lambda, \beta, \gamma$ 为三角形单元面积各个单元形参数,  $\Delta t$ 为时间步长, 上横线表示节点 $j$ 所在单元中所有节点值的叠加, 如:  $\overline{\gamma H u} = \sum_{j=1}^3 \gamma_j H_j v_j$ 。本模式具有一阶精度, 其稳定条件为<sup>[4]</sup>:

$$\Delta t \leq \alpha \min(\Delta x, \Delta y) / (V + \sqrt{g H_{\max}}) (\alpha = 1.2 \sim 2.0) \quad (8)$$

### 1.3 定解条件

初始条件:

$$\begin{cases} u(x, y, t) |_{t=t_0} = u_0(x, y, t_0) \\ v(x, y, t) |_{t=t_0} = v_0(x, y, t_0) \\ z(x, y, t) |_{t=t_0} = z_0(x, y, t_0) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $u_0(x, y, t_0), v_0(x, y, t_0), z_0(x, y, t_0)$ 为初始时刻 $t_0$ 的已知值。

边界条件: 陆边界 $v_n=0$ , 法线方向流速为0; 水边界 $z(x_0, y_0, t)=z^*(x_0, y_0, t)$ ,  $z^*(x_0, y_0, t)$ 为水边界上的潮位值。

### 1.4 计算参数的确定

#### 1.4.1 沉降速率的确定

式(4)中  $-\alpha\omega S$  为沉降项,  $\alpha=0.15\sim 0.4$  为泥沙沉降机率,  $\omega$  为泥沙沉速, 当泥沙粒径小于  $0.03\text{ mm}$  时, 泥沙在海水中将产生絮凝, 严镜海等<sup>[5]</sup>统计了大量资料后得出絮凝沉降速度与海水盐度及泥沙粒径的关系式:

$$F = 5.45 \times 10^{-4} d_{50}^{-1.92}$$

$$\frac{\omega_c - \omega_0}{F\omega_0} = 0.117C^{0.98} \quad (10)$$

式中:  $F$  为快速絮凝因子;  $d_{50}$  为中值粒径;  $\omega_c$  为絮凝沉速;  $C$  为盐度;  $\omega_0$  为单颗粒泥沙沉速, 根据 Yalin 在《输沙力学》<sup>[6]</sup> 中关于单颗粒泥沙沉速计算公式计算。

$$\omega_0 = \sqrt{\left(C_1 \frac{\nu}{D}\right)^2 + C_2 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} gD} - C_1 \frac{\nu}{D} \quad (11)$$

式中:  $C_1, C_2$  是量纲为 1 的系数, 取  $C_1=13.95$ ,  $C_2=1.09$ ;  $\nu$  为运动黏滞系数, 取  $1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $D$  为粒径, 根据实测资料取  $0.0095\text{ mm}$ ;  $\frac{\rho_s - \rho}{\rho}$  为泥沙重率系数, 取  $1.65$ 。由式(10)和(11)计算得出絮凝沉速为  $5.72 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 。

#### 1.4.2 源强的计算

本工程海堤采用控制加载爆炸挤淤置换法处理。根据爆破挤淤的施工工艺, 爆破挤淤填石法就是通过引爆炸药将其周围介质推向四周形成爆炸空腔, 当爆炸产物压力卸载后在重力的作用下堆石体连同底部淤泥回落到空腔中形成“石舌”达到置换淤泥的目的。由于爆破挤淤产生的冲击波作用时间非常短暂, 通常为微秒级<sup>[7-8]</sup>, 与悬浮泥沙输移扩散过程的时间相比, 从爆破瞬间到底泥悬浮于水体中的时间几乎可以忽略。因此可以认为爆破挤淤所产生的悬浮泥沙近似符合瞬时分布源的情况。爆破挤淤产生的悬浮泥沙源强的大小由每次爆破挤淤的泥量与泥沙起悬比相乘得到, 以上两个参数一般需根据当地的实际情况及施工工艺要求等分别加以确定。其中, 爆破挤淤产生的泥沙的起悬比可以参考抛泥源强的确定, 范志杰通过统计大量资料后得出单船抛泥源强为抛泥量的  $5\% \sim 10\%$ <sup>[9]</sup>, 同时, 黄惠明<sup>[10]</sup>在衢山渔港工程爆破挤淤悬浮泥沙输移扩散数值模拟研究中采用的起悬比是  $8\%$ , 姜海峰<sup>[3]</sup>在金塘北部连岛工程围

堤爆破挤淤产生的悬浮泥沙输移扩散数值模拟中采用的起悬比是  $5\%$ 。鉴于此, 综合本工程施工要求、工程作业量及地质条件等确定单次爆破产生的悬浮泥沙的起悬比为  $5\%$ 。该海区淤积物干密度约  $1400 \text{ kg/m}^3$ , 源强性质为间歇源强, 每次持续  $300\text{ s}$ 。由于本海堤范围软基置换厚度沿海堤方向差别较大, 且各段抛填爆破进尺也各有不同, 故沿海堤选取 4 个爆破挤淤计算代表点  $EP_1 \sim EP_4$  (图 2), 分别计算出各爆破点源强, 表 1 和表 2 为各爆破点地质情况及源强计算结果。

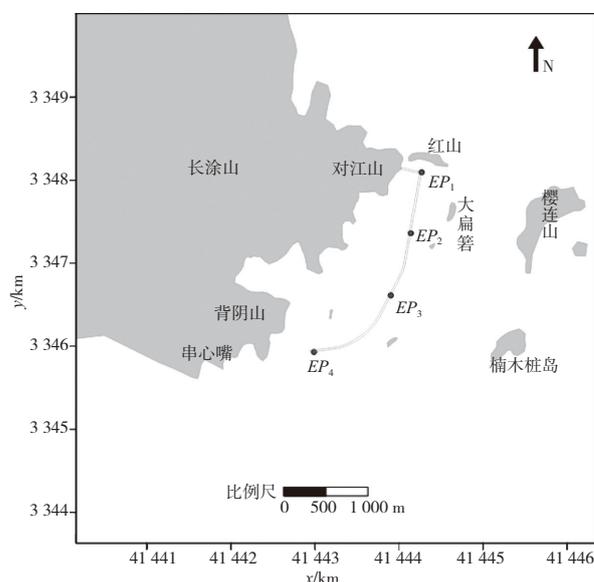


图2 海堤爆破挤淤代表点位置

表1 各爆破点地质情况及施工设计参数

爆破点	堤身下卧土层地质情况	抛填爆破进尺/m	最大置换淤泥厚度/m	底宽控制/m
EP <sub>1</sub>	粉质黏土	7~8	9.5	40~55
EP <sub>2</sub>	粉质黏土	4~5	33.1	40~55
EP <sub>3</sub>	粉质黏土	6~7	14.5	40~55
EP <sub>4</sub>	粉质黏土	5~6	22.0	40~55

表2 各爆破点源强计算结果

爆破点	单次爆破淤泥置换量/m <sup>3</sup>	起悬泥沙体积/m <sup>3</sup>	起悬泥沙质量/g	悬沙源强/(g·s <sup>-1</sup> )
EP <sub>1</sub>	4 180.0	209.000	292 600	975.33
EP <sub>2</sub>	9 102.5	455.125	637 175	2 123.91
EP <sub>3</sub>	5 582.5	279.125	390 775	1 302.58
EP <sub>4</sub>	7 260.0	363.000	508 200	1 694.00

## 2 计算实例

### 2.1 工程概况

岱山樱连门促淤围垦工程位于舟山群岛中部的岱山县大长涂岛东南侧、樱连门水道西侧(图1), 根据工程区地质勘查报告, 工程海堤下淤泥及淤泥质软弱地层厚度范围为5~40 m, 不能直接作为地基基础持力层, 同时考虑到工程建设工期的要求, 建设单位选择采用“控制加载爆炸挤淤置换法”进行地基处理。数学模型计算范围如图3所示, 水域总覆盖面积约2 570 km<sup>2</sup>。网格见图4, 围堤附近网格加密, 空间步长约为30 m, 时间步长取2.0 s。

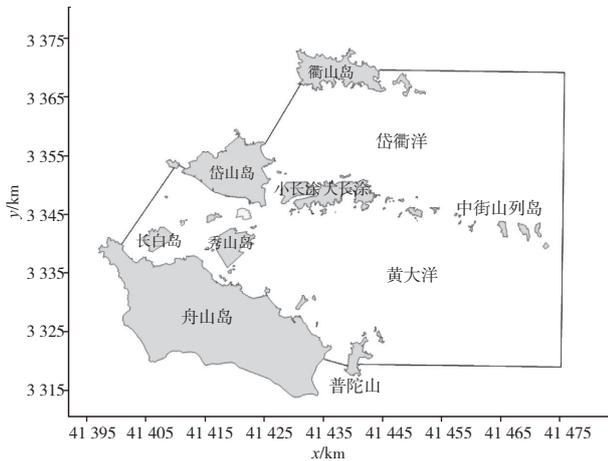


图3 计算区域

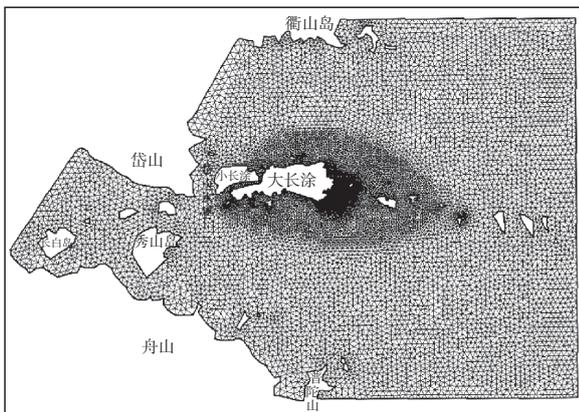


图4 网格示意

围填区所在海域的潮汐属于正规半日浅海潮, 以 $M_2$ 分潮为主, 潮波接近驻波性质。涨潮流以偏西为主, 落潮流以偏东为主。由实测泥沙资料分析可知, 工程区域附近海域垂线平均含沙量

约为1.2 kg/m<sup>3</sup>。悬沙中值粒径约为0.009 5 mm, 属黏性沙。

### 2.2 模型验证

为了验证模型的合理性, 对小长涂临时潮位站(D)和4个实测潮流站( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ 和 $C_4$ )的实测数据进行验证(2011年4月4—11日), 验证点位置见图1。从验证情况看, 计算潮位值与实测值大小、位相基本一致; 各潮流测站流速大小和方向的计算值同实测值也很相近, 误差控制在10%以内<sup>[11]</sup>。说明本文采用的模型合理, 其模拟结果可以用于爆破挤淤所产生的悬浮泥沙输移扩散的计算。

### 2.3 悬浮泥沙输移扩散模拟

利用2011年4月的潮流流速、流向、潮位及含沙量等水文测站资料, 建立了岱山樱连门附近海域的悬沙输移扩散模型, 并在模型得到良好验证的基础上对爆破挤淤产生的悬沙输移扩散过程进行模拟和分析。

水流运动是泥沙输运扩散的主要动力, 本文在潮流数学模型计算的基础上分别对 $EP_1 \sim EP_4$ 共4个爆破挤淤代表点在大潮、中潮和小潮时刻爆破进行悬浮物扩散模拟。通常情况下, 爆破以后进入水体的悬浮泥沙部分发生落淤, 另一部分在潮流的作用下输移扩散。这样, 悬浮泥沙的浓度将随着时间的变化逐渐降低直至海域的含沙量恢复到自然状态。 $EP_2$ 点大、中、小潮时刻爆破后悬浮泥沙浓度增量分布随时间的变化情况见图5~7。

由于爆破时刻爆破点附近水域的潮流主要为偏南方向的落潮流, 所以从图5~7中可以看出爆破挤淤施工产生的高浓度浑水团在潮流的作用下主要向南输移扩散。随着时间的推移, 悬浮泥沙浓度由于扩散和沉降作用而逐渐减小, 在3 h之内工程附近海域含沙量基本恢复到自然状态。

由于爆破挤淤产生的悬浮泥沙引起工程附近海域含沙量的增加, 将影响到海洋生物资源的生存, 国家环境保护总局水质标准规定一、二类水质悬浮物质允许的人为增加量值为10 mg/L<sup>[12]</sup>。为了直观地说明爆破后产生的悬浮泥沙的影响范围, 现作出各爆破点爆破后24 h内其附近海域

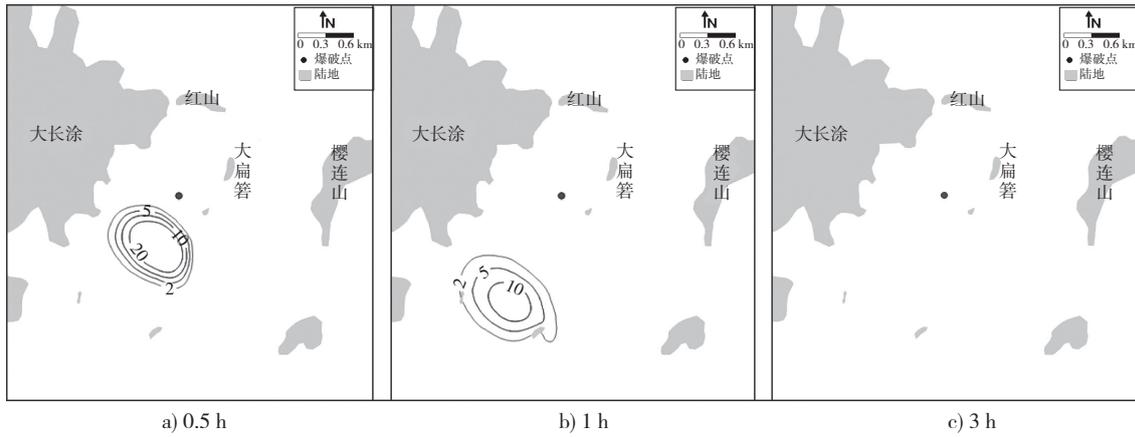


图5 EP<sub>2</sub>点大潮时刻爆破挤淤后不同时刻悬浮物浓度增量等值线分布 (单位: mg/L)

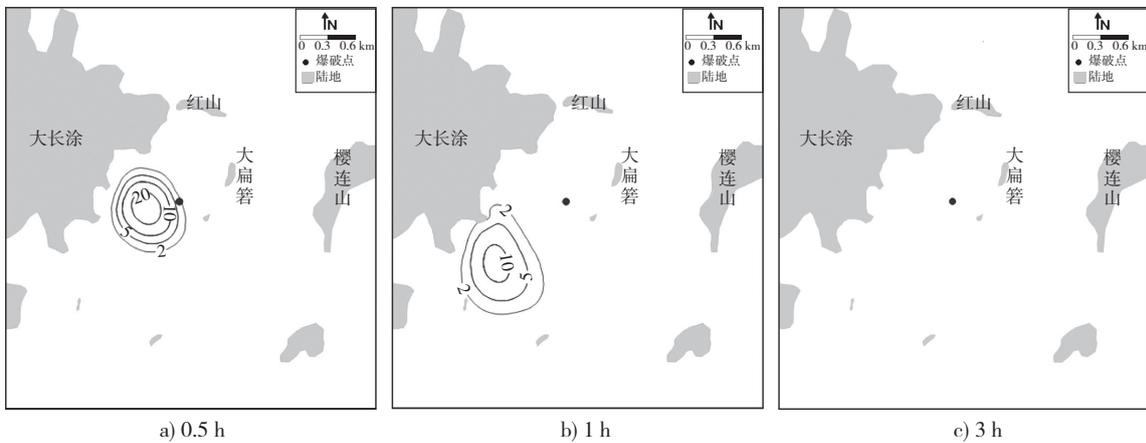


图6 EP<sub>2</sub>点中潮时刻爆破挤淤后不同时刻悬浮物浓度增量等值线分布 (单位: mg/L)

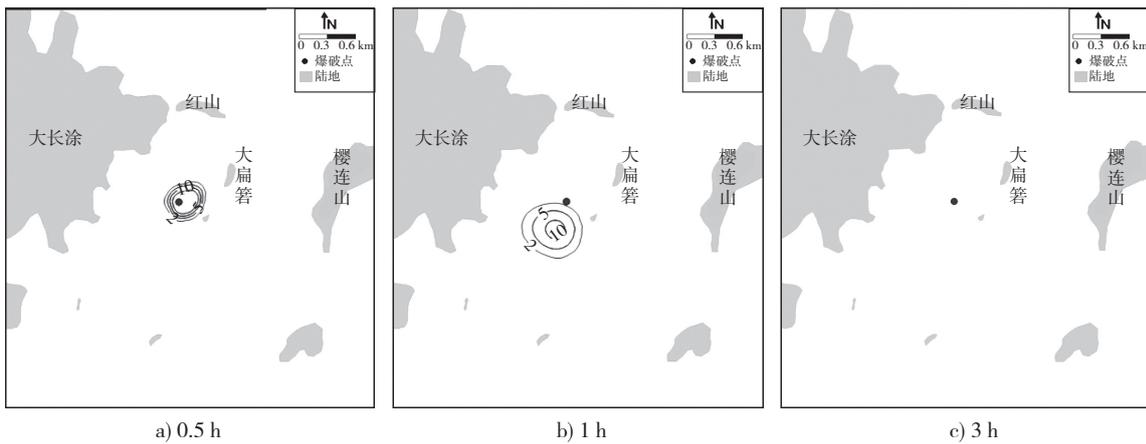


图7 EP<sub>2</sub>点小潮时刻爆破挤淤后不同时刻悬浮物浓度增量等值线分布 (单位: mg/L)

水体中悬沙浓度最大增量的包络线(图8)。结果显示,爆破点附近海域悬浮泥沙浓度分布特点为距离爆破点越远悬沙浓度增量越小,爆破点附近浓度最大。从图中可以看出包络线延伸的方向与爆破后潮流的流向基本一致。从影响范

围来看,EP<sub>2</sub>位置爆破后产生的悬浮泥沙的影响范围相对较大,增量值10 mg/L的包络线面积为0.755 km<sup>2</sup>。EP<sub>1</sub>, EP<sub>2</sub>, EP<sub>4</sub>位置爆破后影响范围较小,增量值10 mg/L的包络线面积分别为0.106 km<sup>2</sup>, 0.180 km<sup>2</sup>, 0.157 km<sup>2</sup>。综合看来,爆破挤淤施工中

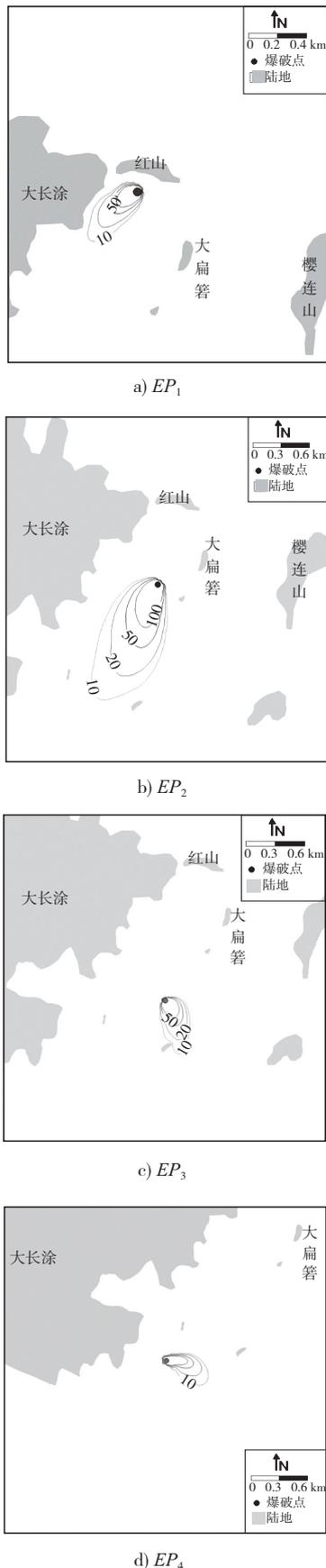


图8 各点爆破挤淤后24 h内最大悬沙浓度增量包络线(单位: mg/L)

产生的悬沙输移距离较短, 扩散范围有限, 扩散时间短暂, 对周围的水环境虽然有一定的影响但持续时间并不长。

### 3 结语

爆破挤淤产生的悬浮泥沙的输移扩散受潮流的影响较大, 其输移扩散的范围及方向很大程度上取决于爆破后工程区域附近潮流的水动力强度及方向。在岱山樱连门水域爆破挤淤后产生的悬浮泥沙浓度增量由于扩散和沉降作用迅速减小, 在爆破3 h后基本降至10 mg/L以下。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。

### 参考文献:

- [1] 乔继延, 丁桦, 郑哲敏. 爆炸排淤填石法中淤泥的本构模型[J]. 工程爆破, 2003 (3): 1-5.
- [2] 乔继延, 丁桦, 郑哲敏. 爆炸排淤填石法机理研究[J]. 岩土工程学报, 2004(3): 349-352.
- [3] 姜海峰. 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.
- [4] JTST 231-2—2010 海岸与河口潮流泥沙模拟技术规范[S].
- [5] 严镜海, 蔡树芝. 细颗粒泥沙絮凝沉降与含盐量关系[J]. 海洋通报, 1984(1): 71-78.
- [6] Yalin M S. 输沙力学[M]. 孙振东, 译. 北京: 科学出版社, 1983: 79-107.
- [7] 于亚伦. 工程爆破理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [8] 孟吉复, 惠鸿斌. 爆破测试技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 袁金雄, 彭辉. 岱山樱连门促淤围垦工程环境影响数模研究专题报告[R]. 杭州: 浙江大学港口海岸与近海工程研究所, 2011.
- [12] GB 3097—1997 海水水质标准[S].