

文章编号:1009-6094(2020)01-0255-10

## 船舶废气排放扩散模拟 计算方法研究\*

彭鑫<sup>1</sup>,文元桥<sup>2,3,4</sup>,肖长诗<sup>1</sup>,黄亮<sup>2,3,4</sup>,  
周春辉<sup>1</sup>,张帆<sup>1</sup>,杨甜甜<sup>1</sup>,张义萌<sup>1</sup>

(1 武汉理工大学航运学院,武汉 430063;

2 武汉理工大学智能交通系统研究中心,武汉 430063;

3 武汉理工大学国家水运安全工程技术研究中心,武汉 430063;

4 武汉理工大学内河航运技术湖北省重点实验室,武汉 430063)

**摘要:**基于船舶 AIS 数据的船舶废气排放评估计算模型,以高斯烟团扩散模型为核心,结合船舶航行和排放特征,构建移动船舶源排放烟团扩散模型。利用控制变量法,在其他变量参数相同条件下,分别设定不同风向、不同大气稳定度、不同高程平面,仿真模拟航行状态下的船舶排放烟团扩散至空间环境中的质量浓度分布情况,分析船舶在不同环境参数下的扩散特征。结果表明,仿真模拟结果与实际气体空间质量浓度分布情况相符。通过在深圳市盐田港区布设船舶废气排放岸基固定嗅探监测设备,对港区进、离港和过往船舶进行大气污染物排放组分(SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、NO、NO<sub>2</sub>)全天在线实时监测,以 SO<sub>2</sub> 作为试验样本气体,船舶排放的 SO<sub>2</sub> 排放至监测站的模拟质量浓度与实际监测质量浓度标准误差为 19.81%,在合理的误差范围内,验证了船舶废气排放扩散模拟计算方法的科学性。

**关键词:**环境学;海洋环境;船舶排放;扩散;高斯模型

**中图分类号:**X51      **文献标志码:**A

**DOI:** 10.13637/j.issn.1009-6094.2019.0124

## 0 引言

船舶排放是全球大气污染的重要贡献源之一,据统计分析,船舶 CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> 排放量分别占全球人为总排放量的 3%、15%、4%~9%<sup>[1-2]</sup>,全球 80% 的船舶在北半球行驶,约 75% 的船舶废气排放发生在离海岸线 400 km 海域范围内<sup>[2]</sup>。当船舶在港口处于停泊状态时,船舶排放会致使沿岸区域 SO<sub>2</sub> 浓度增加 10%~50%<sup>[3]</sup>,船舶排放严重影响着沿海地

区空气质量和沿岸居民的身体康<sup>[4-5]</sup>。因此,船舶废气排放问题受到了国内外研究学者的高度关注,通过设立船舶排放控制区可以限制船舶 SO<sub>x</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放<sup>[6-7]</sup>。

关于船舶废气排放的研究主要围绕船舶废气排放清单的建立、船舶废气排放对环境 and 人类健康的影响以及船舶废气排放的各类监测方法三大内容展开。船舶废气排放清单(SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>等)的准确估算是制定相关排放控制措施和政策的重要支撑,船舶排放清单建立的方法体系分为两类,自上而下(燃油法<sup>[8-10]</sup>、贸易法<sup>[11-12]</sup>)和自下而上<sup>[13-15]</sup>(动力法、统计法),通过对两类方法测算结果进行比较,基于船舶燃油消耗统计方法构建船舶废气排放清单较为简单,而基于船舶活动情况统计构建船舶废气排放清单结果更为精确<sup>[16]</sup>。2009年,Jalkanen等<sup>[13-14]</sup>首次利用 AIS 信息建立了用于计算船舶废气排放的 STEAM(Ship Traffic Emission Assessment Model)模型;2017年,文元桥等<sup>[17]</sup>最先考虑风、浪、流海洋环境因素的影响,建立了改进后的 STEAM 模型,明显提高了船舶废气排放的计算精度。结合船舶废气排放清单构建方法、中尺度和大尺度的大气传输模式(CALPUFF、AERMOD、ADMS),实现船舶废气排放对于大气环境和人类健康的影响评价分析<sup>[18-20]</sup>。在 2002—2005 年,每年约 14 500~37 500 人因船舶排放废气而过早死亡<sup>[18]</sup>。国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)规定 2020 年 1 月 1 日起,全球范围内船用燃油油都将使用硫含量低于 0.5% 的低硫油<sup>[21]</sup>,以降低船舶 SO<sub>x</sub> 的排放,但同时需要有效的船舶废气排放监测手段以作为政策保障。目前,船舶废气排放监测方法主要有嗅探法和光学遥感法,两类方法通常被结合起来监测大气中微量气体浓度<sup>[22-25]</sup>。船舶航行过程中排放的废气具有流动性强、分散性、随机性和不易监测的特点,因此,掌握小尺度的船舶大气污染物浓度分布规律,建立小尺度的船舶排放大气污染物扩散模型是十分必要的,可为海事主管部门监管监测船舶排放奠定模型基础。

高斯扩散模式是在大量实测资料分析基础上,应用湍流扩散的统计理论得到的正态分布假设下的扩散模式<sup>[26]</sup>,被广泛用于研究非重气扩散规律和浓度分布。国内外学者将高斯扩散模型加以改进应用于不同场景的气体扩散模拟研究。美国、日本对于高斯扩散模型在工业固定点源气体扩散模拟方面作了较多研究<sup>[27-29]</sup>。基于高斯线源扩散模式,实现了

\* 收稿日期:2019-02-15

**作者简介:**彭鑫,博士研究生,从事船舶大气污染物排放控制技术研究;文元桥(通信作者),教授,从事船舶大气污染物排放控制技术研究,yqwen@whut.edu.cn。

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2018YFC1407405; 2018YFC0213904);国家自然科学基金青年项目(51709218)

汽车、飞机尾气扩散的实时有效预测模拟<sup>[30-32]</sup>。在国内,付金宇等<sup>[33]</sup>首次将船舶视为固定排放点源,综合考虑船速和风速的影响,基于高斯烟羽扩散模型对船舶尾气扩散进行模拟;Ariana等<sup>[34]</sup>开创性地提出了以船舶AIS数据为基础,采用高斯烟羽和高斯烟团扩散模型模拟估算船舶排放扩散浓度分布,结果表明高斯烟团模型较高斯烟羽模型模拟船舶废气排放扩散结果更为理想。船舶排放源轨迹是离散的移动源,较陆地工业排放源、道路线源排放的排放源特征有较大差异,但以往对船舶排放扩散模拟时,近似将船舶视为固定排放源,忽视了船舶为移动源的特性。本文提出一种基于高斯烟团模型(Gauss Puff Dispersion Model, GPDM),结合船舶AIS(Automatic Identification System)数据、船舶活动水平数据(船舶动力设备功率、船舶排放因子)、环境数据、气象数据(风速、风向、温度、湿度),以及船舶废气排放源的扩散特征,模拟不同气象条件下的船舶废气污染物扩散,以期实现小尺度的船舶废气排放在大环境中的扩散模拟预测。

## 1 船舶废气实时排放量估算

基于AIS和船舶活动水平数据,考虑风、浪、流海洋环境因素后改进船舶废气排放计算模型<sup>[17]</sup>(STEAM, Ship Traffic Estimation Assessment Mode),实现船舶航行过程中SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>的排放量估算。具体计算公式见文献[17]。

$$E_i = \sum_j P_j L_j t_j F_{i,j} = P_m L_m t_m F_{i,m} + P_a L_a t_a F_{i,a} + P_b L_b t_b F_{i,b} \quad (1)$$

式中  $i$  为船舶排放气体类型;  $E_i$  为船舶排放的第  $i$  类气体量, g;  $P$  为船舶动力设备功率, kW;  $j$  为船舶动力设备类型, m、a、b 为船舶三大动力设备, 分别是船舶主机、辅机和锅炉;  $L$  为船舶负荷因子;  $t_j$  为运行时间, h;  $F_{i,j}$  为排放因子, g/(kW·h);  $P_m$ 、 $P_a$ 、 $P_b$  分别为主机功率、辅机功率和锅炉功率, kW;  $L_m$ 、 $L_a$ 、 $L_b$  分别为船舶主机、辅机和锅炉的负荷因子;  $t_m$ 、 $t_a$ 、 $t_b$  分别为主机、辅机和锅炉的运行时间;  $F_{i,m}$ 、 $F_{i,a}$ 、 $F_{i,b}$  分别为第  $i$  种排放气体的主机排放因子、辅机排放因子和锅炉排放因子。

$$L_m = (\nu/\nu_{\max})^3 \quad (2)$$

式中  $\nu$  为考虑风、浪、流影响下修正后的船舶航行速度<sup>[17]</sup>, kn/h;  $\nu_{\max}$  为船舶航行时最大航速, kn/h。将式(2)带入式(1)可得

$$E_i = P_m \left( \frac{\nu}{\nu_{\max}} \right)^3 t_m F_{i,m} + P_a L_a t_a F_{i,a} + P_b L_b t_b F_{i,b} \quad (3)$$

## 2 船舶废气排放扩散建模

### 2.1 建模条件假设

#### 2.1.1 船舶排放扩散特征分析

船舶排放源属于离散移动源,与陆地工业固定排放源、道路线性排放源的排放和扩散特征有显著差异,船舶废气排放和扩散具有以下特征。

1) 移动性:船舶航行过程中,不考虑浪的影响,船舶排放高度基本不变,船舶排放轨迹近似被视为随时间变化的同一高度的离散化移动点源。

2) 离散性:工作中的船舶动力设备为船舶废气排放贡献源,依据船舶航行速度和空间位置,将船舶航行状态分为在航、锚泊和靠泊。在航状态下,船舶AIS轨迹可连成一条航迹线,船舶废气排放的贡献源为船舶主机和辅机;锚泊状态下,船舶AIS轨迹呈现间距较小的无规律离散点,船舶废气排放的贡献源为船舶辅机和锅炉;靠泊状态下,可近似将船舶视为固定排放源,船舶废气排放的贡献源为船舶辅机、锅炉和船上装卸设备。

3) 扩散性:船舶航行于地形开阔、无明显障碍物、近似光滑平面的水面,为船舶废气营造了良好扩散条件。

#### 2.1.2 扩散条件假设

高斯模型适用于模拟非重气云的扩散。在实际船舶烟囱口排放的污染物扩散模拟时,由于受环境因素的影响,烟团沿下风向逐渐扩散,污染物质量浓度随时间推移而不断下降。基于高斯模型建立船舶废气排放扩散模型时,应作以下条件假设。

1) 船舶处于移动状态时,船舶航行速度应不小于 1 m/s,当船舶处于静止状态下,风速应不小于 1 m/s。即当船舶航速小于 1 m/s 时,大气环境风速应大于 1 m/s。

2) 船舶在扩散模拟时间步长范围内,船舶烟囱口排放的废气是连续、稳定且均匀的。

3) 扩散模拟过程中忽略重力和浮力的影响,扩散模型不考虑任何化学反应过程。

4) 扩散气体到达水面被全部反射,水面没有任何吸收作用。

5) 扩散模型只考虑气团朝下风向的扩散,忽略朝其他方向的扩散。

### 2.2 船舶废气排放扩散建模

#### 2.2.1 坐标系建立

GPDM 在求解过程中,以气体排放源位置为坐标原点,下风向沿着  $x$  轴正向分布,横风向沿着  $y$  轴

分布。GPDM 模拟单个固定排放源的烟团扩散过程见图 1。

实际海洋气象场是复杂多变的,且船舶作为移动源的排放轨迹点不总是位于坐标原点,风向也不总是沿着  $x$  轴正向分布。因此,需要将每个船舶航行点的坐标从大地坐标系转换为风向坐标系,即将原在以船舶排放源位置  $(x_0, y_0)$  为坐标原点、以大地坐标系中正东方向为  $x$  轴、以正北方向为  $y$  轴建立的坐标系中点  $A(x, y)$ , 转换至以排放源  $(x_0, y_0)$  为坐标原点、以下风向角度  $d_w$  为  $x$  轴、以横风向为  $y$  轴建立的风向坐标系中的点  $A'(x', y')$ , 坐标转换方法见图 2。

- 1) 当  $x - x_0 > 0$  且  $y - y_0 \geq 0$  时
 
$$\begin{aligned} x' &= D \cos(d'_w - \arcsin((x - x_0)/D)) \\ y' &= D \sin(d'_w - \arcsin((x - x_0)/D)) \end{aligned} \quad (4)$$
- 2) 当  $x - x_0 \geq 0$  且  $y - y_0 < 0$  时
 
$$x' = D \cos(d'_w - \arccos((y - y_0)/D))$$

- 3) 当  $x - x_0 \leq 0$  且  $y - y_0 \leq 0$  时
 
$$\begin{aligned} x' &= D \cos(d'_w - \arctan((x - x_0)/(y - y_0))) + \pi \\ y' &= D \sin(d'_w - \arctan((x - x_0)/(y - y_0))) + \pi \end{aligned} \quad (6)$$
- 4) 当  $x - x_0 < 0$  且  $y - y_0 > 0$  时
 
$$\begin{aligned} x' &= D \cos(d'_w - 2\pi + \arccos((y - y_0)/D)) \\ y' &= D \sin(d'_w - 2\pi + \arccos((y - y_0)/D)) \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $D$  为空间点  $A(x, y)$  与船舶  $(x_0, y_0)$  的距离,  $m$ ;  $d'_w$  为上风向角度。

2.2.2 模型建立

在船舶航行的风向坐标系建立的基础上,基于高斯烟团扩散模型,实现对航行状态下的船舶在任意时刻排放的气体扩散质量浓度分布模拟计算。模型将船舶在航行过程中连续释放的烟团视为有限个瞬时排放烟团的叠加,基于高斯烟团扩散模型计算在任意时间点船舶排放烟团扩散至空间位置点的质量浓度,即任意时刻、任意空间点的船舶废气排放扩散质量浓度为多个烟团扩散至该空间位置点的质量浓度叠加。

假设船舶航行至  $t_n$  时刻,空间点  $(x, y, z)$  在  $t_n$  时刻的质量浓度是船舶在  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  时产生的  $n$  个气团对于点  $(x, y, z)$  质量浓度贡献的叠加,即

$$\rho(x, y, z, t_n) = \sum_{i=1}^n \rho_i(x', y', z', t_n) \quad (8)$$

船舶在  $t_i$  时排放的烟团在  $t_n$  时刻空间点  $(x, y, z)$  处的质量浓度为

$$\begin{aligned} \rho_i(x, y, z, t_n) &= \frac{Q_i}{(2\pi)^{3/2} \sigma_{x'_i} \sigma_{y'_i} \sigma_{z'_i}} \\ &\exp\left[-\frac{(x'_i - u(t_n - t_i))^2}{2\sigma_{x'_i}^2}\right] \exp\left[-\frac{(y'_i)^2}{2\sigma_{y'_i}^2}\right] \\ &\left\{ \exp\left[-\frac{(z'_i - H_e)^2}{2\sigma_{z'_i}^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z'_i + H_e)^2}{2\sigma_{z'_i}^2}\right] \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

式中  $\rho_i(x, y, z, t_n)$  表示船舶在  $t_i$  时排放的废气扩散至任意一点  $(x, y, z)$  处在  $t_n$  时的质量浓度,  $\mu g/m^3$ ;  $Q_i$  表示  $t_i$  时船舶废气排放强度,  $g$ ;  $u$  为风速,  $m/s$ ;  $\sigma_{x'_i}$ 、 $\sigma_{y'_i}$ 、 $\sigma_{z'_i}$  分别为  $x'_i$ 、 $y'_i$ 、 $z'_i$  方向上的扩散系数。Pasquill-Gifford 模型中,依据观测的太阳辐射、云量和地面风速等将大气稳定度分为极不稳定、不稳定、弱不稳定、中性、弱稳定和稳定 6 个级别<sup>[35]</sup>,各个等级的大气稳定度对应的扩散系数计算公式见文献<sup>[36-37]</sup>。以船舶在  $t_i$  时所处的空间位置为原

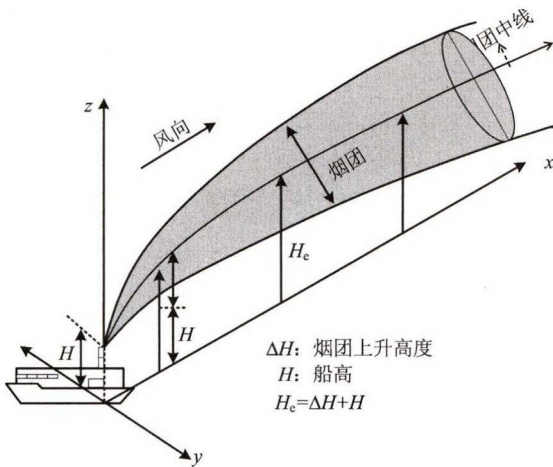


图 1 单源高斯烟团扩散示意图

Fig.1 Diagram of GPDM for single emission source

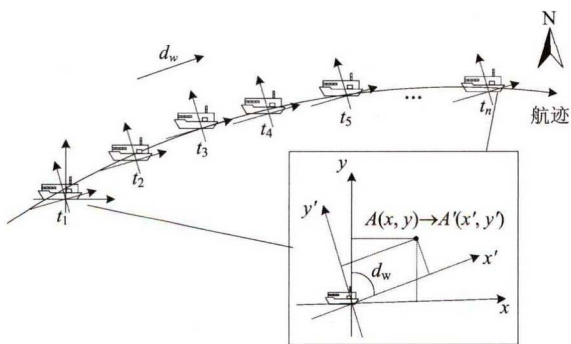


图 2 坐标系转换示意图

Fig.2 Diagram of geodetic coordinate to wind direction coordinate

点,以下风向为横轴,以横风向为纵轴建立风向坐标系,  $x'_i, y'_i, z'_i$  分别表示在该坐标系下距离下风向、横风向和高程距离, m;  $H_e$  为有效源高, m。计算式见文献[38]。

$$H_e = H + \Delta h \quad (10)$$

式中  $H$  为船舶烟囱口至水面高度, m;  $\Delta h$  为烟气抬升高度, m。

### 3 仿真试验

#### 3.1 试验设计

用船舶废气排放扩散模型模拟气体扩散时,影响因素有风速、风向、船舶烟囱高度等。仿真模拟试验以一艘在航状态下的船舶作为排放源,运用改进后的 STEAM 模型计算时间步长为 10 s 的船舶航行轨迹点的  $\text{SO}_2$  排放量。以 STEAM 模型计算的排放量作为排放源强,基于船舶废气排放扩散模型,仿真模拟不同风向、不同高程接受点和不同风速下的船舶排放  $\text{SO}_2$  扩散质量浓度分布,对各组仿真试验结果进行分析,进一步认识船舶废气排放扩散特征。

仿真模型所需扩散参数见表 1。

#### 3.2 试验结果分析

##### 3.2.1 不同风向船舶废气排放扩散模拟

为验证 2.2 节中建立的任意风向下的船舶废气排放扩散模型的有效性,设定扩散参数,风速  $u = 3$  m/s,空间点高程  $z = 0$ 。在第一象限、第二象限、第三象限、第四象限分别选取一个风向角,即分别设定风向  $d_w = 250^\circ$ 、 $d_w = 280^\circ$ 、 $d_w = 45^\circ$ 、 $d_w = 140^\circ$  时,船舶航行至点 A 处的质量浓度分布图,见图 3。

由图 3 可得,船舶排放烟团沿着下风向扩散,烟团自排放源沿下风向呈现近似于扇形团状分布,表明本文对于任意风向的船舶废气排放扩散模拟的有

表 1 扩散参数预设

Table 1 Dispersion parameters setting

大气环境 温度/°C	烟囱 高度/m	烟囱半径/ m	烟囱口平均 排放温度/°C
32	25	2.5	430

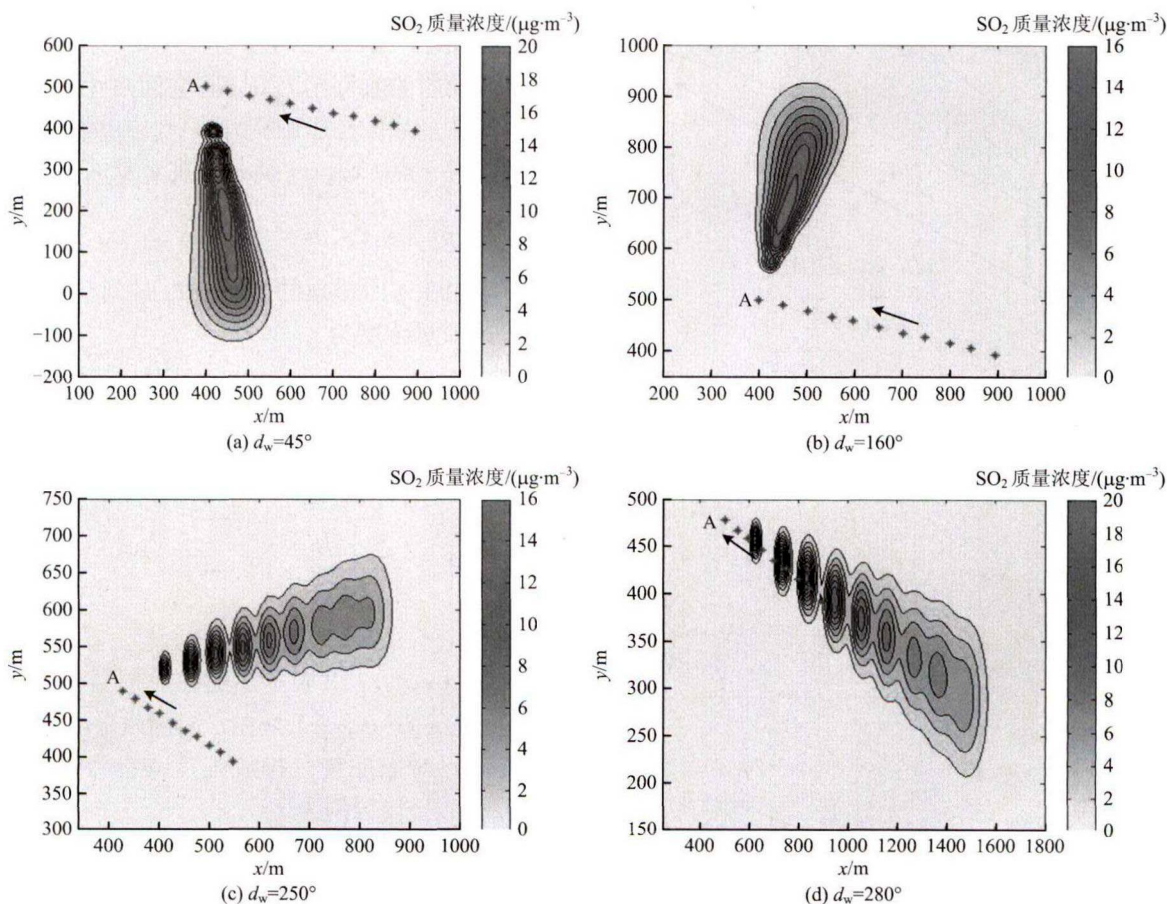


图 3 不同风向船舶废气排放扩散质量浓度分布图

Fig. 3 Diagram of ship exhaust emission diffusion in arbitrary wind direction

效性。距离船舶越远的接收点质量浓度越小,越接近排放源质量浓度越大。

### 3.2.2 不同风速船舶废气排放扩散

风速是大气稳定度划分的重要因素,本文参考不同等级大气稳定度中的风速,研究不同风速下船舶废气排放扩散特征。在白天,设定风速分别为  $u = 1.5 \text{ m/s}$ 、 $u = 2.5 \text{ m/s}$ 、 $u = 4 \text{ m/s}$ 、 $u = 5.5 \text{ m/s}$ ,并设定扩散参数风向  $d_w = 280^\circ$ 、空间点高程  $z = 0 \text{ m}$ ,仿真模拟船舶航行至点 A 处的质量浓度分布,见图 4。

由图 4 可看出,大气稳定度是影响船舶废气排放扩散的重要因素。风速越大(大气稳定度越高),船舶废气排放扩散越明显,扩散烟团越整体远离船舶航行轨迹点。

### 3.2.3 不同高程平面船舶废气排放扩散

在白天,设定扩散参数风向  $d_w = 250^\circ$ 、 $u = 2.5 \text{ m/s}$ ,船舶航行至点 A 处,比较船舶废气扩散至不同高程平面空间点  $z = 0 \text{ m}$ 、 $z = 5 \text{ m}$ 、 $z = 10 \text{ m}$ 、 $z = 15 \text{ m}$  的质量浓度分布,见图 5。

由图 5 可看出,船舶废气排放扩散至不同高程平面的质量浓度分布具有显著差异。随扩散至高程平面不断升高,平面中质量浓度最大值不断减小,扩散烟团逐渐远离船舶航行轨迹点,气体扩散越明显。

## 4 模拟质量浓度与监测质量浓度对比试验分析

### 4.1 试验设计

为验证本文提出的船舶废气排放扩散模型的有效性,以深圳盐田港作为研究区域,在盐田港布设船舶废气排放固定监测系统,试验区域和监测站布设位置见图 6。

船舶废气排放地面监测系统是一种基于气体分析仪的高精度嗅探器,监测系统集成了气体污染物测量系统、AIS 接收站、GPS 接收器、微型气象站、本地数据记录仪、4G 无线路由器与远程控制服务器。气体污染物测量模块由  $\text{CO}_2$  分析仪、 $\text{SO}_2$  分析仪及  $\text{NO}_x$  分析仪组成,实现对船舶大气污染物的高精度

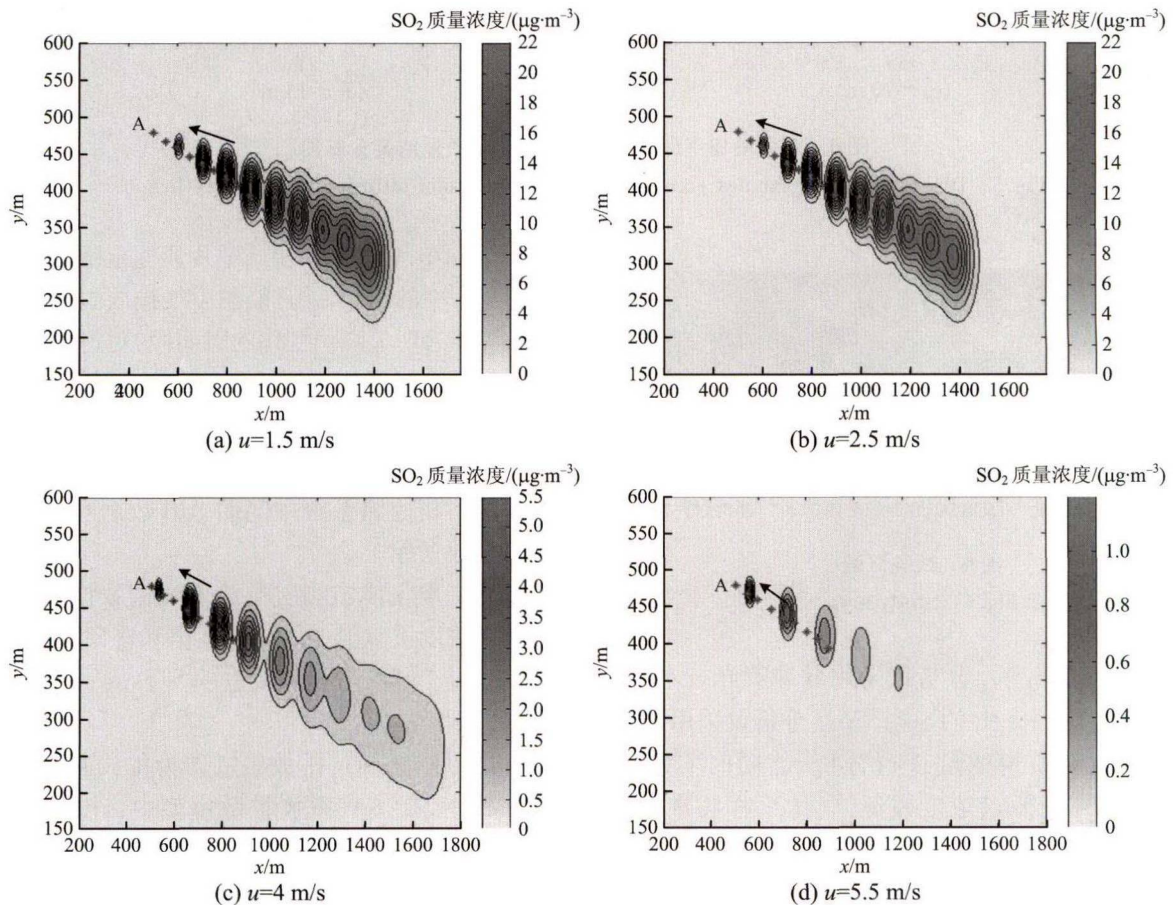


图 4 不同风速船舶废气排放扩散质量浓度分布图

Fig. 4 Diagram of ship exhaust emission mass concentration diffusion in arbitrary wind speed

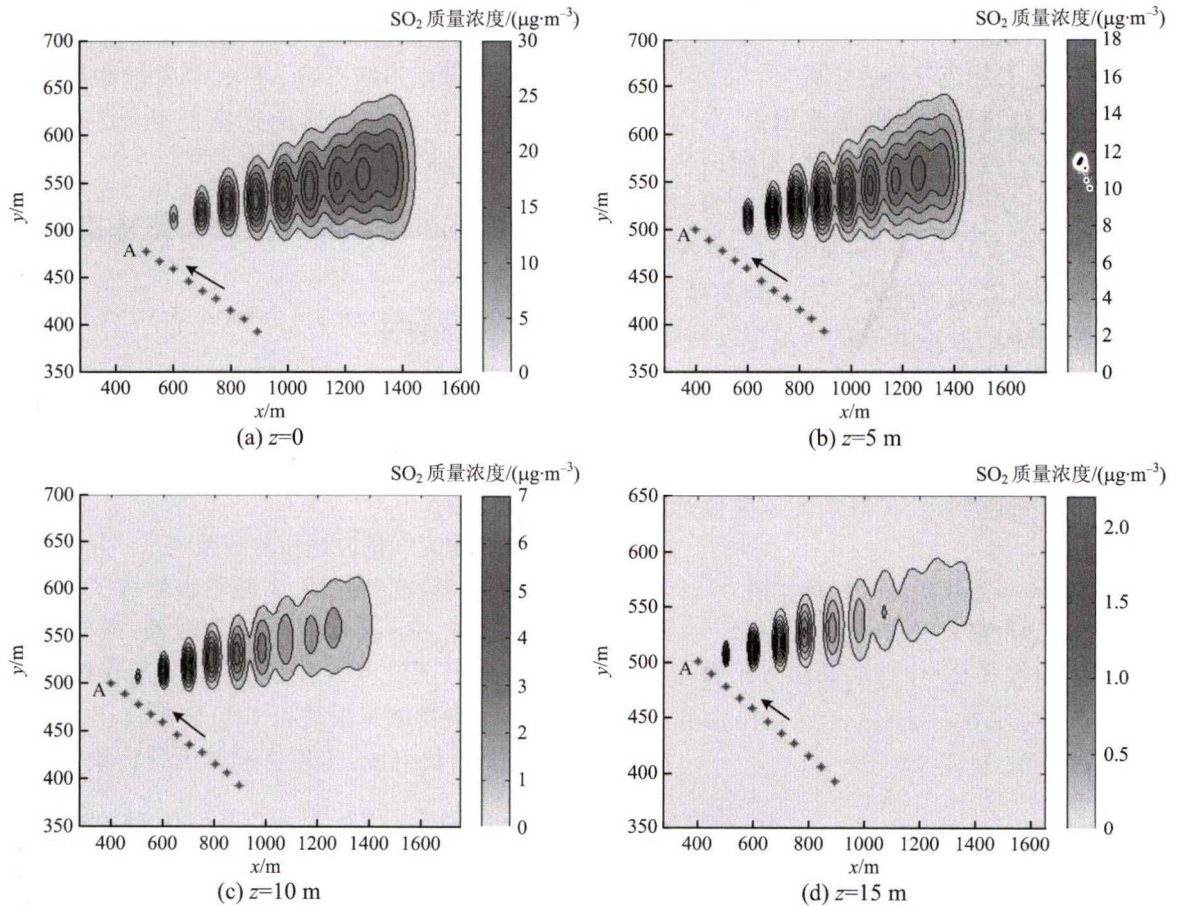


图5 不同高程平面船舶废气排放扩散质量浓度分布图

Fig. 5 Diagram of ship exhaust emission mass concentration diffusion in arbitrary height



图6 试验区域

Fig. 6 Study area

在线监测。其中,SO<sub>2</sub>分析仪采用脉冲荧光技术,可以测量高达100 mg/L的SO<sub>2</sub>。NO<sub>x</sub>分析仪采用发光法对氮氧化物质量浓度进行分析,能同时实现对NO、NO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>的质量浓度监测,气体采样频率为5~10 s,检测精度可达到1 μg/L,并对各种气体进行独立校准。AIS接收站可实时提供船舶经纬度位置、航向、航速等数据信息。微型气象站模块可提供实时观测的周围海洋气象信息(风向、风速、气压、海温、湿度),其中,在实地试验期间,观测到的风速为

1.2~5 m/s,处于高斯模式适用风速范围。选取2艘航行过程中的船舶,并且船舶废气排放固定监测系统的监测值有明显峰值变化的时间段,对这两个时间段内的船舶废气排放模拟质量浓度与监测站实际监测质量浓度数据进行对比分析,具体试验分析过程如下。

1)解析监测系统中船舶AIS数据和气象数据,保存至数据库。

2)提取气体监测质量浓度峰值数据、峰值时间段质量浓度贡献船舶的AIS数据和气象数据。

3)基于AIS数据和改进的STEAM模型,计算船舶废气排放轨迹。

4)以船舶SO<sub>2</sub>排放轨迹作为排放源,带入基于GPD的船舶废气排放扩散模型中,计算扩散至监测站点的质量浓度。

5)对比分析模拟质量浓度与监测质量浓度,并计算误差。

#### 4.2 试验结果

选取船舶排放废气中的SO<sub>2</sub>作为试验气体,对

2 艘船舶排放扩散烟团和监测站监测数据进行对比,2 艘船舶的基本信息和模型所需参数信息见表 2 和 3,图 7 给出了试验船舶的 SO<sub>2</sub> 排放轨迹,图 8 展示了船舶废气排放扩散模型模拟质量浓度(船舶废气排放扩散至监测站质量浓度与背景质量浓度之和)与监测质量浓度对比结果。

从图 7 和 8 可以看出,船舶 SO<sub>2</sub> 排放轨迹曲线

表 2 试验船舶烟囱信息  
Table 2 Parameters of ship's chimney

船名	烟囱数	烟囱高度/m	烟囱半径/m	烟囱口平均排放温度/℃
MSC BETINA	7	21	1.8	305
MSC BERYL	7	25.5	3.3	250

表 3 其他参数信息  
Table 3 Other parameters of ship

船名	主机功率/kW	辅机功率/kW	最大航速/(kn·h <sup>-1</sup> )	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	风向/(°)
MSC BETINA	45 500	12 800	24	4.95	160°
MSC BERYL	45 716	16 000	23.5	4.11	155°

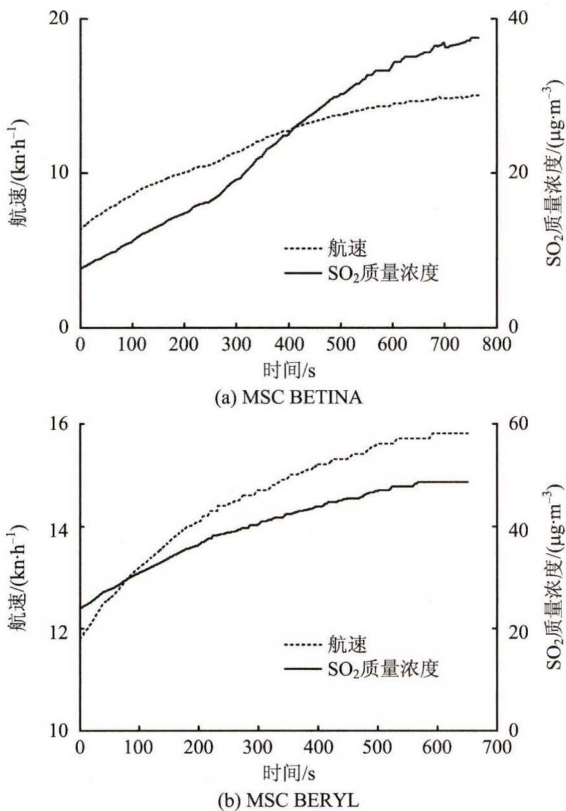


图 7 试验船舶 SO<sub>2</sub> 排放轨迹

Fig.7 SO<sub>2</sub>emissions footprint of ship

与船舶航行速度的变化趋势呈正相关,船舶航行速度越大,船舶 SO<sub>2</sub> 排放量越大。船舶在加速离港过程中,安装在码头的固定监测站 SO<sub>2</sub> 质量浓度监测值也呈增加趋势,随船舶逐渐驶离港口,监测质量浓度也逐渐下降回归至背景质量浓度。图 8 表示 BETINA 和 BERYL 2 艘船在航行过程中,在同一时间产生的船舶烟羽扩散至监测站的模拟质量浓度和实际监测质量浓度的对比结果,模拟质量浓度和监测质量浓度的时间步长为 1 s。BETINA 的模拟质量浓度和监测质量浓度的标准误差为 8.12%,BERYL 的模拟质量浓度和监测质量浓度的标准误差为 12.47%,综合标准误差为 10.295%。在模拟质量浓度和监测质量浓度曲线有明显变化趋势的时间范围内,BETINA 的模拟质量浓度和监测质量浓度的标准误差为 17.94,BERYL 的模拟质量浓度和监测质量浓度的标准误差为 21.68%,综合标准误差为 19.81%。

### 5 结论

1) 对高斯扩散模型在工业、陆上交通的废气排放扩散模拟应用进行归纳总结。以传统固定点源高斯烟团扩散模型为基础,设计了大地坐标系转换为

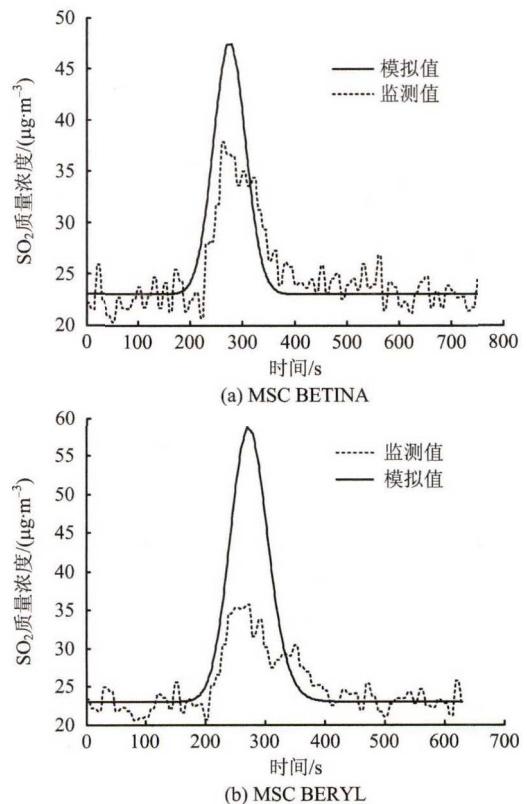


图 8 SO<sub>2</sub> 模拟质量浓度与监测质量浓度对比  
Fig.8 Comparison and analysis between monitoring data and simulation computational data of SO<sub>2</sub>

风向坐标系模型,综合考虑风、浪、流影响下的实时船舶废气排放量计算模型,建立了任意风向下的移动船舶废气排放扩散计算模型。

2)针对影响船舶废气排放扩散模拟结果的关键因素,运用本文提出的船舶废气排放扩散模型,模拟得出不同风向、不同风速、不同扩散高程平面的气体扩散结果,试验结果表明这三大因素对于船舶废气排放扩散模拟结果有明显的影响。

3)以深圳市盐田港为试验场地,现场布设岸基固定气体监测站,在线实时监测  $\text{SO}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  质量浓度变化。基于本文提出的船舶废气排放扩散模型,对经过检测站的2艘集装箱船废气排放烟团扩散进行模拟,并与岸基监测站监测数据进行了对比分析。模拟质量浓度与监测站监测质量浓度误差在合理范围内,船舶废气排放扩散模型可有效模拟船舶废气扩散,但模拟结果的精度有待进一步优化和提高。

#### References(参考文献):

- [1] CORBETT J J, WINEBRAK J J, GREEN E H, et al. Mortality from ship emissions: a global assessment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(24): 8512-8518.
- [2] SAUSEN R. Transport impacts on atmosphere and climate [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(37): 4646-4647.
- [3] MATTHIAS V, BEWERSDORFF I, AULINGER A, et al. The contribution of ship emissions to air pollution in the North Sea regions [J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(6): 2241-2250.
- [4] LIU Huan, FU Mingliang, JIN Xinxin, et al. Health and climate impacts of ocean-going vessels in East Asia[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1037-1041.
- [5] CHEN Dongsheng, ZHAO Na, LANG Jianlei, et al. Contribution of ship emissions to the concentration of  $\text{PM}_{2.5}$ : a comprehensive study using AIS data and WRF/Chem model in Bohai Rim Region, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610: 1476-1486.
- [6] ASTROM S, YARAMENKA K, WINNES H, et al. The costs and benefits of a nitrogen emission control area in the Baltic and North Seas [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 59: 223-236.
- [7] EYRING V, ISAKSEN I S A, BERNTSEN T, et al. Transport impacts on atmosphere and climate: shipping [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(37): 4735-4771.
- [8] GUTTIKUNDA S K, CARMUCHAELG R, STREETS D G. The growing contribution of sulfur emissions from ships in Asian waters, 1988-1995 [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(26): 4425-4439.
- [9] YANG Dongqing, KWAN S H, LU Tao, et al. An emission inventory of marine vessels in Shanghai in 2003 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(15): 5183-5190.
- [10] JIN Taosheng(金陶胜), YIN Xiaoge(殷小鸽), XU Jia(许嘉), et al. Air pollutants emission inventory from commercial ships of Tianjin Harbor [J]. *Marine Environmental Science(海洋环境科学)*, 2009, 28(6): 623-625.
- [11] PSARAFTIS H N, KONTOVAS C A.  $\text{CO}_2$  emission statistics for the world commercial fleet WMU [J]. *Journal of Maritime Affairs*, 2009, 8: 1-25.
- [12] STREETS D G, GUTTIKUNDA S K, CARMICHAEL G R. The growing contribution of sulfur emissions from ships in Asian waters, 1988-1995 [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(26): 4425-4439.
- [13] JALKANEN J P, BRINK A, KALLI J, et al. A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(23): 9209-9223.
- [14] JALKANEN J P, JOHANSSON L, KUKKANEN J, et al. Extension of an assessment model of ship traffic exhaust emissions for particulate matter and carbon monoxide [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(5): 2641-2659.
- [15] WEN Yuanqiao(文元桥), GENG Xiaoqiao(耿晓巧), WU Dingyong(吴定勇), et al. Estimation model of ship exhaust emissions based on AIS information [J]. *Navigation of China(中国航海)*, 2015(4): 96-101.
- [16] XING Hui(邢辉), DUAN Shulin(段树林), HUANG Lianzhong(黄连忠), et al. Estimation of exhaust emissions from sea-going vessels in near port areas of Liaoning Province [J]. *Research of Environmental Sciences(环境科学研究)*, 2016(1): 29-35.
- [17] WEN Yuanqiao(文元桥), GENG Xiaoqiao(耿晓巧), HUANG Liang(黄亮), et al. Calculation model for ship exhaust emissions on a count of the impacts of wind, wave and water current included [J]. *Journal of Safety and Environment(安全与环境学报)*, 2017, 17(5): 1969-1974.
- [18] HUANG Liang, WEN Yuanqiao, GENG Xiaoqiao, et al. Estimation and spatio-temporal analysis of ship exhaust emission in a port area [J]. *Ocean Engineering*, 2017, 140: 401-411.
- [19] FAN Qianzhu, ZHANG Yan, MA Weichun, et al. Spa-

- tial and seasonal dynamics of ship emissions over the Yangtze River Delta and East China Sea and their potential environmental influence[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(3): 1322–1329.
- [20] EYRING V, KOHLER H W, VAN A J, et al. Emissions from international shipping: 1. the last 50 years [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D17): 1–12.
- [21] YAO Xin(姚鑫), MU Junmin(牟军敏), ZHANG Xingjian(张行健). Ship exhaust emission inventories at the Yangtze River estuary based on the terrestrial AIS data[J]. *Journal of Safety and Environment(安全与环境学报)*, 2017, 17(4): 1510–1514.
- [22] BEECKEN J, MELLQVIST J, SALO K, et al. Emission factors of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and particles from ships in Neva Bay from ground-based and helicopter-borne measurements and AIS-based modeling[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(9): 5229–5241.
- [23] MELLQVIST J, BEECKEN J, CONDE V, et al. *Final report to Dansih EPA: surveillance of sulfur emissions from ships in Danish waters*[R]. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2017.
- [24] MELLQVIST J, CONDE V, BEECKEN J, et al. *Fixed remote surveillance of fuel sulfur content in ships from fixed sites in the Göteborg ship channel and Öresund bridge*[R]. Stockholm, Sweden: EU Strategy for the Baltic Sea Region, 2017.
- [25] HUANG Shengjian(黄胜健). *Research on the ship pollutant emission monitoring system(船舶排放污染物智能监测系统研究)*[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2017.
- [26] WU Zhongbiao(吴忠标). *Air pollution control engineering(大气污染控制工程)*[M]. Beijing: Social Sciences Press, 2002.
- [27] OZA R B, INDUMATI S P, PURANIK V D, et al. Simplified approach for reconstructing the atmospheric source term for Fukushima Daiichi nuclear power plant accident using scanty meteorological data[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2013, 58: 95–101.
- [28] FUSHIMI A, KAWASHIMA H, KAJIHARA H. Source apportionment based on an atmospheric dispersion model and multiple linear regression analysis[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(7): 1323–1334.
- [29] GARAIA-DIAZ J C, GOZALVEZ-ZAFRILLA J M. Uncertainty and sensitive analysis of environmental model for risk assessments: an industrial case study[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2012, 107: 16–22.
- [30] CAO Huiling(曹惠玲), GAO Jianzhong(高建忠), LIANG Damin(梁大敏). Research on emission diffusion model of civil aircraft engine in cruise[J]. *Environmental Science and Technology(环境科学与技术)*, 2014, 37(S1): 444–447.
- [31] TIAN Miao(田苗). *Study on line-source dispersion model for vehicle exhaust pollutant from highway(公路机动车排气线源扩散模式的研究)*[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [32] TAO Shuangcheng(陶双成). *Emission inventory and control strategies of road mobile sources in Guanzhong metropolitan area(关中城市群道路移动源污染物排放清单与减排策略研究)*[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [33] FU Jinyu(付金宇), LI Ying(李颖). Study on ship's exhaust-gas diffusion based on Gaussian plume model [J]. *Marine Science Bulletin(海洋通报)*, 2018, 37(2): 235–240.
- [34] ARIANA M, PITANA T, ARTANA B K, et al. Gaussian plume and puff model to estimate ship emission dispersion by combining automatic identification system (AIS) and geographic information system (GIS)[J]. *Journal of Maritime Researches*, 2013, 3(1): 1–13.
- [35] CAO X, ROY G, HURLEY W J, et al. Dispersion coefficients for Gaussian puff models [J]. *Boundary-layer Meteorology*, 2011, 139(3): 487–500.
- [36] CROWL D A, LOUVAR J F. *Chemical process safety: fundamentals with applications*[M]. New Jersey: Pearson Education, 2001.
- [37] GIFFORD F A. Turbulent diffusion-typing schemes: a review[J]. *Nuclear Safety*, 1976, 17(1): 68–86.
- [38] BOSANQUET C H. The rise of a hot waste gas plume [J]. *Journal Inst. Fuel*, 1957, 30: 322–328.

## Improved calculation model for ship exhaust emission dispersion

PENG Xin<sup>1</sup>, WEN Yuan-qiao<sup>2,3,4</sup>, XIAO Chang-shi<sup>1</sup>, HUANG Liang<sup>2,3,4</sup>, ZHOU Chun-hui<sup>1</sup>, ZHANG Fan<sup>1</sup>, YANG Tian-tian<sup>1</sup>, ZHANG Yi-meng<sup>1</sup>

(1 School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2 Intelligent Transport Systems Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 3 National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 4 Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** The given paper is devoted to presenting an improved

calculation model of the ship exhaust emission dispersion to supervise and regulate the ship transportation and navigation exhaust emissions more truthfully. As a matter of fact, ship emission standard involve one of the characteristic features in relation to its mobility, dispersibility, randomness and monitoring control. In the previous studies, the ship exhaust emission source used to be regarded as the stationary source emission one. But we have first of all set up a coordinate transformation relation model between the geodetic coordinate and the wind direction coordinate, while taking into account the influential factors of the wind, wave and current to build such an emission dispersion model of the mobile ship, based on the features of its navigation, emissions and diffusion. However, the former model is used as the calculation model of the ship exhaust emissions based on the AIS and the ship functional activity data, with the Gaussian Puff Dispersion Model (GPDM) taken as its central part of the given model. Therefore, the model can be adopted to calculate the ship emission diffuse into the atmospheric environment with its gas content rate in any wind directions and in any temporal moments. Thus, analyzing the features of the ship emission plume dispersion in any different environmental parameters under the different control effects, the simulation of the spatial distribution of the ship emission puff dispersion in the above said 3 diffusion scenarios in the different wind directions, the wind velocity and elevation, as well as the other parameters, would be taken as permanent and unchanged factors. The simulation results can be proven well in accord with the actual distributions of the gaseous pollutants. The gaseous pollutants sniffer monitoring system can be set up in Yantian Port, Shenzhen, to perform the on-line monitoring ship exhaust emissions ( $\text{SO}_2/\text{CO}_2/\text{NO}/\text{NO}_2$ ) throughout the daily terms. It can also provide the concentration rate information of the ship emission plume spreading and scattering to the nearby other-involved monitoring stations. Thus, finally, when choosing 2 ships as the case study sample, and the  $\text{SO}_2$  emission by the ship as the test gas sample to verify the model, the calculation error rate between the simulation data and the real monitoring data may turn out merely 19.81%, which implies that the error rate gap should be put into the reasonable category. It also implies that the dispersion model of the mobile ship exhaust emissions proves to be scientific as well as applicable.

**Key words:** environmentalology; marine environment; ship emission; diffusion; Gaussian model

**CLC number:** X51      **Document code:** A

**Article ID:** 1009-6094(2020)01-0255-10

文章编号:1009-6094(2020)01-0264-07

## 热水解-厌氧消化工艺中 污泥的触变性分析\*

曹秀芹,柴莲莲,王鑫

(北京建筑大学环境与能源工程学院,城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室,北京 100044)

**摘要:**采用触变动力学系数作为评价指标,通过流变试验研究了热水解-厌氧消化联合工艺中污泥标准化黏度和触变性的变化规律,并探讨了屈服应力和触变性二者间的联系,从触变性角度为热水解-厌氧消化污泥的处理处置提供参考依据。结果表明:与滞后环相比,用触变动力学系数  $K$  更适合表征污泥的触变性;调配污泥、热水解污泥和厌氧消化污泥的标准化黏度均随时间增大逐渐减小;3种污泥的触变性随 TSS 质量分数增大而减小,经热水解-厌氧消化后污泥的触变性增大,流动性增强;污泥屈服应力越大,触变性越小,稳定性越强。

**关键词:**环境工程学;触变动力学系数;标准化黏度;触变性;屈服应力;流动性

**中图分类号:** X705      **文献标志码:** A

**DOI:** 10.13637/j.issn.1009-6094.2019.0720

### 0 引言

近年来,我国水处理行业迅猛发展,污水处理副产物污泥产量剧增,预计2020年将达6000万t(80%含水率)<sup>[1]</sup>。由于长期以来我国污水处理行业“重水轻泥”现象严重,大量污泥未得到妥善处理,存在二次污染的隐患<sup>[2]</sup>。厌氧消化技术因其可实现污泥的减量化、稳定化、资源化和无害化,已成为污泥处理处置的主要技术之一。作为厌氧消化前的预处理工艺,热水解能够实现污泥细胞的破壁,促进胞内有机物质从固相到液相的转移,加快厌氧消化水解进程,从而提高消化效率,降低运行成本。热水解-厌氧消化联合工艺可实现污泥处理处置的高效化和稳定化,已得到国内外学者的广泛关注<sup>[3-4]</sup>。

触变性是流变特性的一项重要指标,是由污泥内部结构破坏和重建速率不一致造成的,宏观表现为污泥受到外力后的流动变形<sup>[5-9]</sup>。1923年, Bos-

\* 收稿日期:2019-06-04

**作者简介:**曹秀芹,教授,从事污泥及固体废弃物减量与资源化研究,caoxiuqin@bucea.edu.cn。

**基金项目:**北京建筑大学市属高校基本科研业务专项资金资助项目(X18182)