

# 港口航行船舶大气污染物排放扩散模拟

柳娟<sup>1\*</sup>, 谢文彬<sup>1</sup>, 陈举涛<sup>2</sup>

(1. 厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361102; 2. 厦门大学信息学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 为了实现对船舶污染物扩散的实时模拟, 运用网络爬虫技术获取了厦门港内船舶的基本信息和自动识别系统 (automatic identification system, AIS) 数据, 通过基于船舶引擎功率的动力法测算源强。结合气象状况, 在高斯烟团模型的基础上, 建立了一种适用于运动排放源和 AIS 数据的船舶污染扩散模型, 对污染浓度分布情况进行实时模拟。利用 Web 地理信息系统 (geographic information system, GIS) 技术, 分析了船舶进出港、停泊和巡航工况下 NO<sub>2</sub> 分布, 下风向不同距离的扩散规律以及 NO<sub>2</sub> 对监测站点的贡献。结果表明在 2020 年 1 月 3 日 9: 00 至 10: 00, 选取的货船对陆地监测站点的 NO<sub>2</sub> 贡献率为 0.56%。该模型综合考虑了船舶状态和气象条件, 能够跟踪船舶污染扩散的实时情况, 辅助相关监管人员对实时污染分布、预警、溯源等方面的问题作出决策, 具有良好的应用前景。

**关键词:** 扩散模拟; 船舶污染; Web 地理信息系统; 时空分布; 排放特征

**中图分类号:** X51 **文献标志码:** A

海运的蓬勃发展给港口地区带来了巨大的经济收益, 但与此同时, 船舶的废气排放污染问题不容小觑。船舶排放清单中的 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, 颗粒物 (particulate matter, PM), 碳氢化合物 (hydrocarbon, HC) 等污染物对人体健康和环境有严重危害<sup>[1-2]</sup>。

针对该现状, 排放清单的计算模型在不断完善中<sup>[3-5]</sup>。此外, 由于 AIS 提供了船舶的速度、坐标、航行时间等数据, 学者们结合 GIS 对污染情况进行了可视化分析, 青岛市港口<sup>[6]</sup>、上海港<sup>[7]</sup>、深圳市港口<sup>[8]</sup>和天津港<sup>[9]</sup>的船舶污染物 GIS 空间分布研究已经有所进展, 这将有利于当地进一步制定有针对性的大气污染防治方案。这些分析大多利用专业的 GIS 软件, 通过网格划分和统计法进行空间分布计算, 但大气污染扩散与排放源、气象条件直接相关, 为了实现实时监控需要对扩散过程建模分析。

高斯大气扩散模型是一种能够模拟、处理污染物在大气中输送和扩散问题的数学模型<sup>[10]</sup>, 其扩散符合正态分布。在陆地交通的分析中, 线源模型应用广泛<sup>[11]</sup>, 但是航线上船舶分布分散, 线源模型不再适用。此外, 基于高斯扩散原理已有一些相对成熟的商业方案, 例如 AERMOD 和 CALPUFF

**收稿日期:** 2020-01-20 **录用日期:** 2020-04-19

**基金项目:** 福建省自然科学基金 (2017J01099); 十三五国家海洋经济创新发展示范项目 (16PFW034SF02)

**\*通信作者:** cecyliu@xmu.edu.cn

模型。一方面，这些模型需要苛刻的输入数据，包括地形数据、地面气象数据和探空数据<sup>[12]</sup>，数据收集成本高、难度大；另一方面，模型较为复杂，数据输出频率低，难以应用到实时分析。

本研究选择厦门港作为研究区域，采用爬虫技术获取船舶基本信息和 AIS 数据，计算船舶排放 NO<sub>2</sub> 的源强，再结合气象资料和高斯烟团模型，对船舶排放 NO<sub>2</sub> 的扩散分布进行模拟，借助于 Web GIS 服务功能，实现对 NO<sub>2</sub> 扩散的动态模拟和可视化。

## 1 研究方法

### 1.1 数据来源

船舶污染物的排放源强与航行速度和航行状态密切相关，污染物扩散情况受到航行时的大气稳定度、风向、风速等的影响，因此本文获取的数据应具备实时性。同一时刻厦门港船舶的动态信息达上百条，人工统计并处理这些数据费时费力。针对此问题，本文实现了一个多线程的网络爬虫模块，从中国港口网上获取了进出厦门港船舶的基本信息和 AIS 数据，数据更新最短间隔为 2 min，满足实时分析的条件。

局部海洋区域实时天气数据获取难度大，因此选择地面气象站数据近似模拟航行时的天气状况。气象数据采用 rp5.ru 网站 (<https://rp5.ru/>) 数据，数据来源为厦门市狐尾山气象站，提供每小时的天气信息，包括气温、云量、风向和风速等，并具备历史数据下载的功能。

### 1.2 数据处理

将采集到的数据进行规范化处理，分为两个部分：船舶基本信息和船舶航行信息。其中船舶基本信息包含包括水上移动通信业务标识码 (maritime mobile service identify, MMSI)、船名、类型、船长、船宽和吃水深度；船舶航行信息包括 MMSI 号、航行时间、经纬度、航向、航速、风速、风向和云量。

在数据处理时，排放源强的分辨率取决于船舶 AIS 数据的频率，天气数据逐小时变化，并且认为一段 AIS 轨迹中，天气状态不改变。如图 1 所示，以 MySQL 数据库作为数据载体，通过网络爬虫技术获取船舶数据，计算源强和扩散参数，结合船舶航行信息建立扩散模型，最终展示在 Web GIS 上。

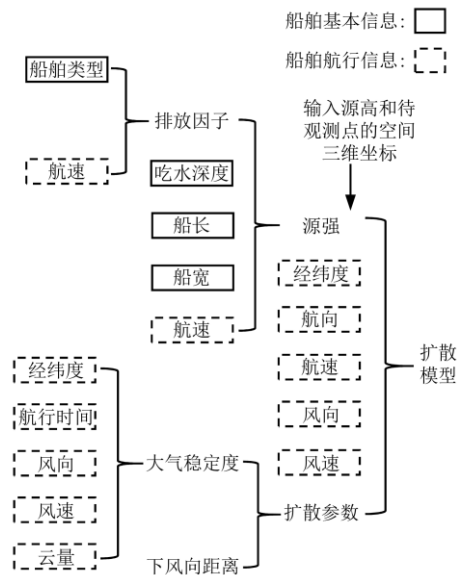


图 1 数据处理流程图

Fig.1 Data processing flowchart

## 2 船舶污染排放高斯扩散模型

### 2.1 高斯烟团模型建立

以高斯扩散模型为基础，并满足以下假设：1) 每一段数据的源强恒定连续；2) 整个扩散空间内，风速均匀稳定；3) 海面 and 地面全反射扩散气体；4) 扩散气体质量守恒，不发生沉降、不发生任何化学反应。张锦荣等<sup>[13]</sup>针对液氯运输泄漏问题提出了适用于移动点源的高斯烟团模型，但模型只适用于匀速直线运动，船舶实际航行过程中，AIS 数据不断更新，源强、航行速度和方向都在改变，因此模型需要进一步优化，使其适用于船舶污染扩散的研究。

高斯烟团模型可表示为：

$$C(x, y, z, t) = \frac{E}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{(x-\bar{u}t)^2}{2\sigma_x^2}\right] \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

式中： $C$ 表示空间中一点 $(x, y, z)$ 污染物在 $t$ 时刻的浓度， $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ； $t$ 表示观测时刻， $\text{s}$ ； $E$ 表示污染物排放量， $\text{g}$ ； $\bar{u}$ 表示平均风速， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ； $H$ 表示有效源高， $\text{m}$ ； $\sigma_x$ 表示下风向扩散参数， $\text{m}$ ； $\sigma_y$ 表示横向扩散参数， $\text{m}$ ； $\sigma_z$ 表示纵向扩散参数， $\text{m}$ 。

假设污染物随船舶的运动方向排放，沿着风向移动，看作由无数个时间间隔极短、有序的烟团组成。如图 2 所示，将风向定义 $x$ 轴方向，在 $t_1$ 时刻获取第 1 段 AIS 数据：船舶与风向成 $\alpha_1$ 角，单位 $\text{deg}$ ；航行速度为 $v_1$ ，单位 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；航行距离为 $v_1(t_2 - t_1)$ ，单位 $\text{m}$ ；污染物排放源强为 $Q_1$ ，单位 $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ 。之后获取第 2 段 AIS 数据……在第 $i$ 段 AIS 数据时，以在 $t'$ 时刻排放的一个烟团为例，排放源强为 $Q_i$ ，该烟团的初始坐标为 $(x_{0i}, y_{0i}, H)$ 。到了 $t$ 时刻，受风向影响，该烟团的坐标为 $(x_{0i} + \bar{u}(t - t'), y_{0i}, H)$ 。

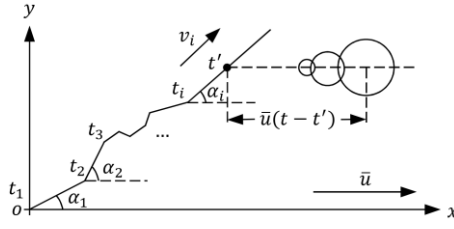


图 2 高斯烟团模型坐标系定义

Fig.2 Gaussian puff model coordinate system definition

在第*i*段 AIS 数据  $t'$  时刻排放的烟团的扩散公式为:

$$\begin{cases} dc_i = \frac{Q_i dt'}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{(x-\bar{u}(t-t')-x_{0i})^2}{2\sigma_x^2}\right] \cdot \exp\left(-\frac{(y-y_{0i})^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \\ x_{0i} = v_i(t' - t_i) \cos\alpha_i + \sum_{j=1}^{i-1} v_j(t_{j+1} - t_j) \cos\alpha_j \\ y_{0i} = v_i(t' - t_i) \sin\alpha_i + \sum_{j=1}^{i-1} v_j(t_{j+1} - t_j) \sin\alpha_j \end{cases} \quad (2)$$

假设污染物在  $t_r$  时刻停止排放, 单位 s。若整个  $t$  过程中, 污染物都在保持排放, 则有  $t_r = t$ 。对于移动连续点源在  $(x, y, z)$  的浓度, 可等效为无数个时间间隔极短的烟团的叠加:

$$C(x, y, z, t) = \int_{t_i}^{t_r} dc_i + \sum_{j=1}^{i-1} \int_{t_j}^{t_{j+1}} dc_j \quad (3)$$

针对 AIS 数据的特点, 模型将船舶的轨迹分解成了多段运动, 综合考虑了船舶的移动方向、速度和气象条件, 对船舶停泊和无风的特殊情况同样适用。当前段 AIS 数据的污染情况还与历史段的污染数据相关, 实际应用式(3)时, 最早段的 AIS 数据贡献很小, 为提高算法效率, 可选择近几段历史数据进行计算。

## 2.2 排放源强计算

自下而上基于船舶引擎功率的动力法是目前计算排放清单的主流方法<sup>[2]</sup>。以该方法作为基础, 可以得到某类污染物的源强计算模型如下:

$$Q = P \times EF / 3600 \quad (4)$$

式中:  $Q$  表示船舶排放的该类污染物的源强,  $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $EF$  表示该类污染物的排放因子,  $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ , 和船舶类型、航行状态有关;  $P$  表示发动机的功率, kW。由于网络爬虫技术获取的船体信息中缺乏功率数据, 参考文献[14], 结合船舶的长度、宽度、吃水深度、船速等参数计算得到:

$$P = \frac{P_E}{C_p} = \frac{Rv}{1000C_p} \quad (5)$$

式中:  $P_E$  表示船舶的主机功率, kW;  $C_p$  表示螺旋桨的推进系数, 一般在 0.5~0.7 之间;  $v$  表示船舶的行驶速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $R$  表示船舶的基本阻力, N, 可以通过船体基本信息获得。

$$R = \frac{R_f}{\eta} = a_f L_w d (2 + B/2d) / ((1.625 - C_b)\eta) \quad (6)$$

式中:  $R_f$  表示船舶行驶时的摩擦阻力, N;  $\eta$  表示基本阻力中摩擦阻力的占比;  $a_f$  表示每平方米湿表面积的摩擦阻力,  $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $L_w$  表示吃水线的长度, m;  $d$  表示船舶的吃水深度, m;  $B$  表示船舶

的宽度,  $m$ ;  $C_b$ 表示船舶的方形系数。

## 2.3 大气扩散参数计算

大气扩散参数是高斯大气扩散模式对污染物浓度估算的基本参数。在高斯大气扩散模式中通常需要获取下风向扩散参数 $\sigma_x$ 、横向扩散参数 $\sigma_y$ 和纵向扩散参数 $\sigma_z$ ,表示在其各自方向上的标准差。参考文献[15],通过太阳高度角和云量确定太阳辐射等级,而后得到大气稳定度级别(A~F),结合表1确定扩散参数。

表1 大气扩散参数  
Tab.1 Atmospheric diffusion parameters

大气稳定度	$\sigma_x=\sigma_y$	$\sigma_z$	m
A	$0.22x(1+0.0001x)^{-1/2}$	0.20x	
B	$0.16x(1+0.0001x)^{-1/2}$	0.12x	
C	$0.11x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1+0.0002x)^{-1/2}$	
D	$0.08x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1+0.0015x)^{-1/2}$	
E	$0.06x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x(1+0.0003x)^{-1/2}$	
F	$0.04x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.016x(1+0.0003x)^{-1/2}$	

## 3 扩散模型仿真与模拟

### 3.1 模型参数确定

船舶排放的 $NO_x$ 居不同污染物之首,占比超过一半,是形成光化学烟雾和酸雨的重要原因。在船舶污染排放中, $NO$ 和 $NO_2$ 在 $NO_x$ 中所占比达到90%以上,且 $NO$ 随着扩散会快速氧化成 $NO_2$ ,可以近似将 $NO_x$ 扩散等效为 $NO_2$ 扩散。因此本文以 $NO_2$ 污染物作为分析对象。

以2020年1月3日航行过程中MMSI号为477464800的货船作为分析对象,船舶长141 m,宽23 m,吃水深度7.7 m,以海平面为基准,定义有效源高 $H$ 为32 m。如图3所示,当日航行过程按照目的地分为2段轨迹,08:24至08:54,该船从点(S1)以巡航状态行驶至点(S7)后,开始减速进港,09:06分到达点(S8)后停泊在海天码头,停泊期间假定船舶由岸电系统提供能源,不再产生污染。15:18,船舶从点(S9)离港,15:24到达点(S10)后进入巡航状态驶离厦门港。



图3 该货船2020年1月3日的航行轨迹

Fig.3 The trajectory of the cargo ship on January 3, 2020

模型仿真参数如表2所示，其中天气数据选择的是狐尾山气象站8—11时和14—17时的平均气象数据，船速为该段轨迹的平均速度。通过式(4)至式(6)计算源强，源强取轨迹两端瞬时源强的平均值，计算过程中， $C_p$ 、 $a_f$ 、 $C_b$ 、 $\eta$ 参数的确定参考文献[16]，货船航行和进出港状态的排放因子 $EF$ 的选择参考文献[6]，取值为  $17.9 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

表2 高斯模型仿真参数

Tab.2 Gaussian model simulation parameters

轨迹序号	时间	船舶状态	$\text{NO}_2$ 源强 $/(\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$	船速 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	轨迹始末位置	风向	风速 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	大气稳定度
(S6)-(S7)	08:50— 08:54	巡航	2.157	4.090	118.07243° E 24.50574° N ~ 118.07674° E 24.51367° N	西北	1	B
(S7)-(S8)	08:54— 09:06	进港	0.729	1.321	118.07674° E 24.51367° N ~ 118.08080° E 24.52141° N	西北	1	B
(S8)	09:06— 15:10	停泊	0	0	118.08080° E 24.52141° N			
(S9)-(S10)	15:18— 15:24	出港	1.262	2.474	118.07955° E 24.52370° N ~ 118.07460° E 24.51706° N	东南	3	C
(S11)-(S12)	15:29—	巡航	8.193	4.187	118.07106° E	东南	3	C

	15:38				24.50710° N ~			
					118.06350° E			
					24.48790° N			
(S12)-(S13)	15:38—	巡航	8.666	5.537	118.06350° E	东南	3	C
	15:44				24.48790° N ~			
					118.05389° E			
					24.47220° N			

### 3.2 Web GIS 与扩散模型集成

本文使用 Java 作为开发语言，基于 B/S 架构，后端采用 SSM 框架，通过 MySQL 数据库实现船舶基本信息、航行信息存取。前端使用 Vue.js 框架，利用异步加载技术提高响应速度，调用百度地图 API 将模型以 Web GIS 的形式呈现。在后端中建立扩散模型代码，计算扩散模型式(3)时，需要将经纬度信息通过高斯-克吕格投影正算转换成直角坐标系，式中历史数据选择最近的一段。以船舶航行至图 3 中的点(S13)为例，在计算该时刻 $t_r$ 的浓度分布时，取图 3 点(S11)为 $t_1$ 起始时刻，船舶的位置对应图 2 中的 $t_2-t_3$ 区间，式(3)计算公式可简化为式(7)。

$$C(x, y, z, t) = \int_{t_2}^{t_r} dc_2 + \int_{t_1}^{t_2} dc_1 \quad (7)$$

将计算得到的浓度分布通过高斯-克吕格投影反算成 WGS-84 经纬度坐标，再通过前端代码转换至百度坐标系。在 Web GIS 呈现时，利用热力图标签，将自定义的浓度范围区间和颜色进行匹配，将不同区间的颜色叠加，实现通过颜色区分污染浓度分布情况。

### 3.3 扩散模型可靠性分析

由于实测数据难以直接比较，商业模型需要的条件很多，可以选择类似模型与本文模型进行对比从而验证可靠性。付金字等提出了用于船舶尾气扩散研究的改进高斯烟羽模型，分析了风速、风向等模型参数对扩散的影响<sup>[15]</sup>，并进一步将模型应用于“桑吉”轮撞船事故分析<sup>[17]</sup>。采用本文模型和文献[15]的模型，根据船舶航速和风速的矢量合成，得到实际烟羽扩散速度 $u_0$ ，以船舶烟囱口为原点，分别对货船在点(S10)时不同 z 平面下烟羽方向的浓度进行分析，结果如图 4 所示。

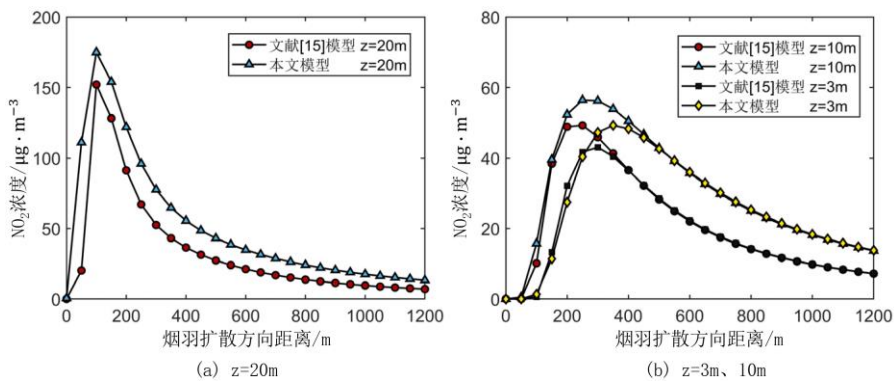


图 4 两种模型在不同 z 平面烟羽扩散方向上的浓度分布情况

Fig.4 Concentration distribution of two models in different z-plane smoke plume diffusion directions

虽然高斯烟羽模型假定扩散达到稳定状态，不适用于实时分析，但是货船从点(S9)航行至点(S10)耗时 360 s，此时本文模型在图 4 所示区间内已达到稳态，因此能够对两个模型烟羽扩散方向上的浓度分布情况进行比较。可以看出，NO<sub>2</sub> 浓度先升后降，距离源高越近的平面，浓度的峰值越高，上升的时间越短。两种模型的浓度上升和下降速率相似，本文模型 NO<sub>2</sub> 峰值略高于文献[15]的模型，峰值最大相对误差为 15.56%，整体浓度也高于文献[15]的模型。两种模型的浓度变化趋势一致，本文提出的模型具备一定可靠性。

### 3.4 模型关键参数敏感性分析

为了探究模型关键参数对扩散的影响，以货船从点(S6)到达点(S8)的进港状态作为分析，取海平面高度上  $z=3$  m，实际扩散情况如图 5(a)所示，图中的五边形代表船舶的位置和航向。

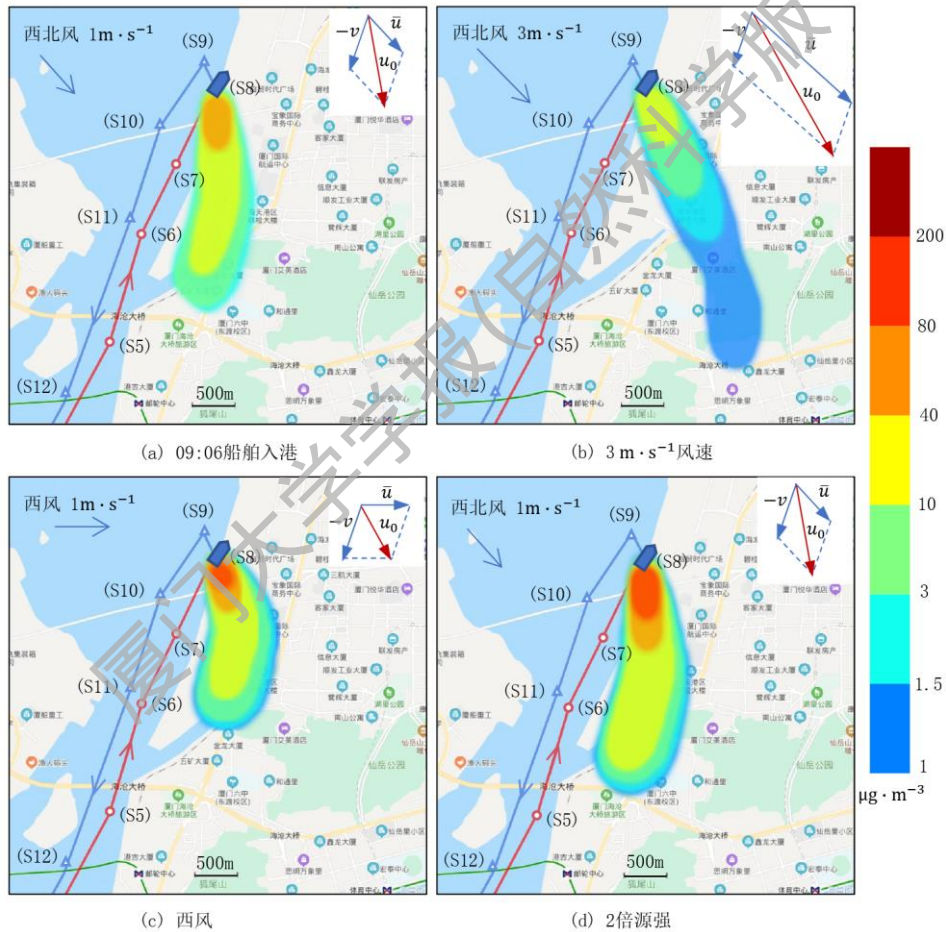


图 5 不同关键参数对模型扩散的影响

Fig.5 Influence of different key parameters on model diffusion

通过控制变量法，将风速增加到  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，如图 5(b)所示，整体污染区域往东南偏移，扩散范围明显增大，由于 NO<sub>2</sub> 扩散能力增强，中心污染的浓度下降到  $10 \sim 40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。图 5(c)中改为西风，此时污染区域向东扩增，向北收缩，由于实际烟羽扩散速度  $u_0$  下降，导致 NO<sub>2</sub> 扩散能力下降，中心



浓度上升到  $80\sim 200\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。图 5(d)中将点(S6)到达点(S8)的排放源强改为原来的 2 倍，污染区域形状相似，影响范围有所增加， $\text{NO}_2$  浓度明显上升。由此可知，在本文扩散模型中，风速、风向和排放源强均是影响实际烟羽浓度范围和扩散分布的重要因素。

### 3.5 不同航行状态下的 Web GIS 模拟

为了模拟船舶不同航行状态的扩散分布，参考表 2 参数，根据船舶的运行速度和航向<sup>[18]</sup>，将船舶状态分为进港、离港、停泊和巡航，取海平面高度上  $z=3\ \text{m}$ ，对船舶不同航行状态下  $\text{NO}_2$  污染物扩散的空间分布情况进行模拟，如图 6 所示。

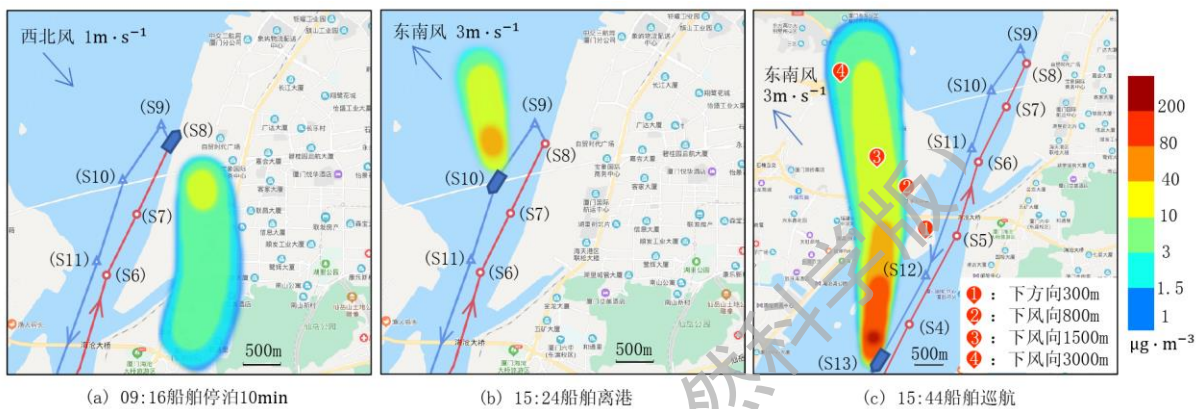


图 6 不同状态下船舶污染物  $\text{NO}_2$  的扩散情况

Fig.6 Diffusion of  $\text{NO}_2$  emitted by the ship in different states

图 5(a)为船舶减速入港，陆地上部分区域的浓度大于  $40\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ；图 6(a)为船舶停泊 10 min 污染自由扩散，此时污染区域增大，但浓度明显下降，大于  $40\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的区域消失；图 6(b)为船舶离港状态，浓度范围和进港相似。此时风向从西北改变为东南，风速增加到  $3\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由此可以看出，在同一天内风向、风速总是动态变化，从而影响了大气稳定度，导致污染物扩散的方向和影响的范围存在明显差异。因此，以整日天气预报作为模型的气象条件会存在较大误差，本文获取实时天气的过程是必要的。图 6(c)中船舶处于巡航状态，此时污染区域大、浓度高，部分区域浓度达到了  $200\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上，故掌握下风向的扩散规律对于污染预警和防治有重要意义。

以船舶从点(S11)出发为时间原点，分别对巡航状态时不同下风向距离的浓度变化进行分析，结果如图 7 所示。

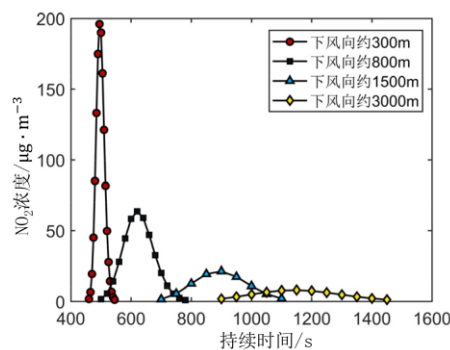


图 7 巡航状态时不同下风向距离 NO<sub>2</sub> 浓度的变化规律

Fig.7 Variation of NO<sub>2</sub> concentration in different downwind distances during cruise

图 7 中仅统计污染浓度大于  $1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  的时间节点。经计算，下风向 300, 800, 1500 和 3000 m 的 1 h 平均浓度分别为 1.83, 2.19, 1.33 和  $0.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，远低于 GB 3095—2012《环境空气质量标准》<sup>[19]</sup>中 NO<sub>2</sub> 污染物 1 h 内的平均浓度限值  $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。下风向 300 m 位于火烧屿风景区，本次污染期间的峰值浓度达到  $196.99 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，污染时间为 88 s，考虑到持续时间较短且浓度高，应设置预警让岛上人群提前规避。下风向 800 m 位于码头附近，本次污染持续时间较长，达到 4.8 min，峰值浓度为  $63.63 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，可以有选择地在浓度较高的时间范围进行污染规避。下风向 1500 和 3000 m，污染的浓度均位于安全指标内，不影响人群正常作业。但通过对比可以看出，下风向距离越大，污染残余时间越久，此时多船排放造成的污染滞留、叠加的情况应受到重视。

### 3.6 对监测站的贡献评估

目前对船舶污染的监控，主要通过陆地监测点间接测量。湖里中学空气质量监测站 ( $118.09275^\circ \text{E } 24.50632^\circ \text{N}$ )，位置如图 3 所示，监测 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 共 6 项环境空气常规指标，每隔 1 h 发布一次均值数据。图 8 中，取海平面高度上  $z=3 \text{ m}$ ，分别展示了船舶到港停泊后不同时间段 NO<sub>2</sub> 的扩散范围及监测站的浓度值。

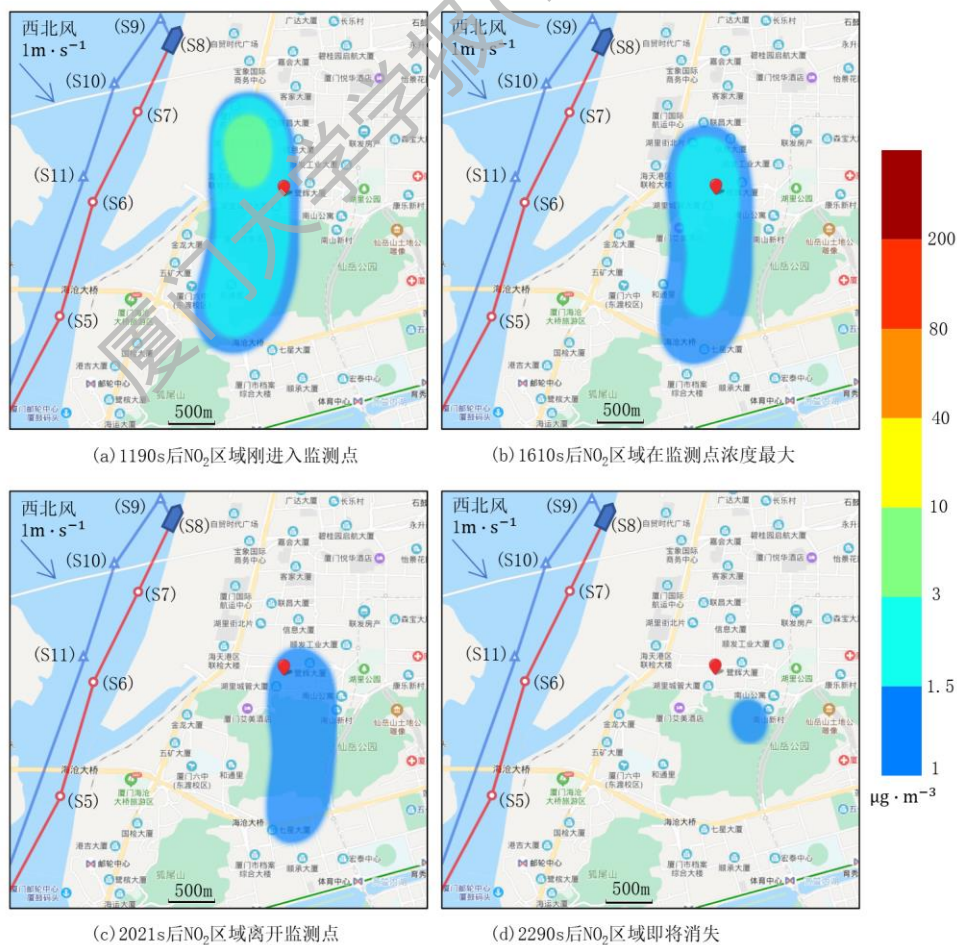


图 8 船舶排放的 NO<sub>2</sub> 在监测站的扩散情况

Fig.8 Diffusion of NO<sub>2</sub> emitted by the ship at the monitoring station

选择表 2 中点(S6)~(S8)期间排放的 NO<sub>2</sub> 作为污染源, 红色指示物为监测站位置。图 8(a)中船舶排放的 NO<sub>2</sub> 污染区刚进入监测站, 此时距船舶停泊已过近 20 min, 污染扩散具有明显的滞后性。在本时刻, 污染区域面积较大, 大部分污染区浓度大于  $1.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 部分区域浓度大于  $3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。监测站的位置没有在浓度的边界上, 这是由于网页缩放导致出现显示偏差。图 8(b)中, 由船舶排放的 NO<sub>2</sub> 在监测站浓度达到最大, 此时整体污染区域有所收缩, 大于  $3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的污染区完全消失。图 8(c)中, 船舶排放的 NO<sub>2</sub> 区域即将全部离开监测站, 此时整体污染区域进一步收缩, 大于  $1.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的污染区完全消失。图 8(d)中, 污染区域很小, 10 s 后污染区域将完全消失。

根据中国港口网的不完全统计, 当日共计 455 艘船位于厦门港内, 其中有 58 艘客船, 31 艘油轮, 71 艘货船, 船长大于 100 m 的货船达到了 37 艘, 因此用于模拟的货船具有一定的代表性。当日 9:00 至 10:00, 湖里中学监测站公布的 NO<sub>2</sub> 浓度为  $55 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 经计算, 该货船在监测站污染期间的平均贡献为  $1.35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 1 h 内的平均贡献为  $0.31 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 单艘船的污染占比达到 0.56%。基于 AIS 数据动态信息, 假设在当日 9:00 至 10:00 之间, 有 5 艘同等规模的货船进入海天码头, 由于扩散条件一致, 估算可得该时段内这些货船对监测站的 NO<sub>2</sub> 贡献为 2.81%。该时段为西北风, 货船在巡航状态下排放的 NO<sub>2</sub> 无法扩散到湖里中学监测站, 因此实际排放 NO<sub>2</sub> 对城市的影响远高于此值。由此可见, 船舶排放对城市污染有潜在影响, 本模型在监测站的污染溯源上能起到一定的辅助作用。

在后续研究中, 将以多艘船的实时污染贡献作为探索方向。在计算多艘船的污染排放时, 先在后端程序中处理各艘船的浓度分布, 进行叠加, 将数据通过 Web GIS 的形式展示。通过计算港口内某个时段所有类型船舶在附近监测站的烟团浓度叠加情况, 分析实际监测曲线中是否有对应污染物的浓度波动, 可进一步验证模型的可靠性。

### 3.7 不足与改进

当前模型距离真正实际应用阶段仍存在一定距离, 主要有以下三个方面的不足之处:

- 1) AIS 船舶发动机功率是估算的, 并非实际值, 可以购买包含发动机功率的 AIS 数据。
- 2) 在计算海面上的污染物扩散情况时, 由于海上气象数据的缺乏, 按照陆地测站数据来使用, 存在不确定性, 选用海上浮标的气象站数据会更可靠。
- 3) 气态污染物由于大气活性, 会发生化学反应而减少, 而排放的 PM 相对惰性, 适合扩散模拟, 但重力沉降损失影响大, 因此模型还需要进一步优化, 综合考虑反应时间系数、阻尼系数和重力沉降系数。

## 4 结论

1) 本文基于 Web 开发方式, 获取了 AIS 和气象数据并进行规范化处理, 搭建实时分析模式, 在船舶污染扩散时空分布上进行了初探。方案具有普适性, 能够方便地拓展到对其他港口和流域的分析。

2) 针对 AIS 数据的特点, 建立了一种适用于船舶实时排放源的高斯烟团模型。仿真结果表明, 用于模拟的货船在不同航行状态时,  $\text{NO}_2$  扩散受到气象数据、源强、船速和航向等多方面影响, 污染强度和范围呈现出较大的差异, 在巡航状态下风向 300 m 处, 出现了  $196.99 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的瞬时高浓度, 并且随着下风向距离的增加, 污染的持续时间增长。此外, 模型的建立使得监测船舶对陆地监测站点的污染贡献成为可能, 仿真时段内单艘货船的  $\text{NO}_2$  占比为 0.56%。

3) 相较于 AERMOD 和 CALPUFF 等成熟的商业模型, 本文的模型所需数据简单, 计算方便, 数据输出频率高, 易于集成到 Web 开发, 具备良好的应用前景: 如追踪某一条船的轨迹及实时污染扩散情况, 汇总所有进出港船舶的污染扩散情况, 在面对船舶起火、气体泄漏等险情时, 能辅助相关监测人员掌握扩散特点, 做出正确决策等。

## 参考文献:

- [1] LIU H, FU M, JIN X, et al. Health and climate impacts of ocean-going vessels in East Asia[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1037-1041.
- [2] 刘欢, 商轶, 金欣欣, 等. 船舶排放清单研究方法及进展[J]. 环境科学学报, 2018, 38(1): 1-12.
- [3] 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.
- [4] JALKANEN J P, JOHANSSON L, KUKKONEN 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.
- [5] JOHANSSON L, JALKANEN J P, KUKKONEN J. Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution[J]. Atmospheric Environment, 2017, 167: 403-415.
- [6] 刘静, 王静, 宋传真, 等. 青岛市港口船舶大气污染排放清单的建立及应用[J]. 中国环境监测, 2011, 27(3): 50-53.
- [7] 伏晴艳, 沈寅, 张健. 上海港船舶大气污染物排放清单研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(5): 57-64.
- [8] 杨静, 尹佩玲, 叶斯琪, 等. 深圳市船舶排放清单与时空特征研究[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1217-1226.
- [9] 张安民, 刘禹, 张殿君, 等. 基于 GIS 的天津港船舶大气污染空间分布规律[J]. 测绘科学技术学报, 2018, 35(6): 76-80+86.
- [10] 黄金杰, 杨桂花, 马骏驰. 基于高斯的大气污染评价模型[J]. 计算机仿真, 2011, 28(2): 101-104.
- [11] 王文, 于雷, 裴文文, 等. 基于高斯线源模式的主要尾气扩散模型综述[J]. 交通环保, 2004, 25(5): 7-10.
- [12] 刘桂芳, 潘文斌. 大气扩散模型 AERMOD 与 CALPUFF 输入数据的对比研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(9): 93-96.
- [13] 张锦荣, 李平, 王文璇. 液氯运输泄漏事故扩散风险分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(7): 104-108.
- [14] HUANG L, WEN Y, GENG X, et al. Estimation and spatio-temporal analysis of ship exhaust emission in a port area[J]. Ocean Engineering, 2017, 140: 401-411.
- [15] 付金字, 李颖. 基于高斯烟羽模型的船舶尾气扩散研究[J]. 海洋通报, 2018, 37(2): 235-240.
- [16] 刘芳然. 海区船舶废气排放评估方法研究[D]. 厦门: 集美大学, 2015: 15-22.

- [17] 付金宇, 李颖, 吴鹏, 等. 海上事故有害气体的扩散研究——以“桑吉”轮撞船事故为例[J]. 海洋通报, 2019, 38(1): 115-120.
- [18] 朱倩茹, 廖程浩, 王龙, 等. 基于 AIS 数据的精细化船舶排放清单方法[J]. 中国环境科学, 2017, 37(12): 4493-4500.
- [19] 环境环保部, 国家质量监督检验检疫总局. GB 3095—2012 环境空气质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.

# Simulation study on air pollutant emission and diffusion of ships sailing in port

LIU Juan<sup>1\*</sup>, XIE Wenbin<sup>1</sup>, CHEN Jutao<sup>2</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. School of Informatics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** In order to realize the real-time simulation of the ship's pollutant diffusion, the web crawler technology was used to obtain the basic information and automatic identification system (AIS) data of ships in Xiamen Port. The source strength was calculated by the dynamic method based on the engine power. Based on the meteorological conditions and the gaussian puff model, a ship pollution diffusion model suitable for moving emission sources and AIS data was established to simulate the pollution concentration distribution in real time. Using Web geographic information system (GIS) technology, the NO<sub>2</sub> distribution of ships entering and leaving ports, berthing, and cruising, the diffusion law of different downwind distances and the relative contribution of NO<sub>2</sub> to monitoring sites were analyzed. The results show that the relative contribution of ship-related NO<sub>2</sub> to the monitoring concentration at Huli station is 0.56% from 9 am to 10 am on January 3, 2020. This model integrates ship status and weather conditions, and can track the real-time situation of ship pollution spread. It has good prospects to assist relevant supervisors in making decisions on issues such as real-time pollution distribution, early warning, and traceability.

**Keywords:** diffusion simulation; ship pollution; Web geographic information system; spatiotemporal distribution; emission characteristics