

文章编号:1000-4653(2025)04-0183-09

基于排放扩散特征的在航船舶燃油硫含量监测方法

王超^{1,2}, 李雪瑶³, 吴浩¹

(1. 金陵科技学院 网络与通信工程学院, 江苏 南京 211169; 2. 武汉理工大学 内河航运技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070; 3. 东南大学 经济管理学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 文章提出了一种以排放扩散特征为基础的在航船舶燃油硫含量监测方法, 通过分析监测点获取的 SO₂ 扩散浓度, 并运用高斯烟团修正模型进行计算, 最终推导出船舶排放源的强度。进一步, 利用船舶主机与辅机的基本参数, 构建燃油消耗量计算模型。最后, 基于 SO₂ 排放速率与燃油消耗量的比值, 反算出船舶燃油硫含量。经验证, 本方法在超标船舶检出率和检测异常率方面均优于当前广泛采用的碳平衡法, 分别达到 86.60% 和 2.06%。在连续 30 天的实际监测中, 共成功检测 2 743 艘船舶的燃油硫含量, 有效检出率为 82.72%; 其中 131 艘涉嫌硫含量超标, 经核实 111 艘确属不合格, 检测准确率为 84.73%。实测数据证实, 该方法能够在不获取 CO₂ 的条件下, 实现对在航船舶燃油硫含量的有效实时监测。

关键词: 船舶排放; 硫含量反算; 燃油消耗量; 光谱分析; 碳平衡法; 高斯烟团修正模型

中图分类号: U677.2 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1000-4653.2025.04.021

Study on the method for monitoring the fuel sulfur content of vessels based on emission and diffusion characteristics

WANG Chao^{1,2}, LI Xueyao³, WU Hao¹

(1. School of Network&Communication Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China; 2. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. School of Economics and Management, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: To effectively identify vessels using fuel with excessive sulfur content, a reverse calculation method for determining fuel sulfur content was developed based on emission and diffusion characteristics. A Gaussian puff compensation model was applied to estimate the emission source strength of vessels from monitored SO₂ concentrations at designated points. In addition, a computational model for vessel fuel consumption was established using key vessel parameters, including the power and fuel consumption rates of main and auxiliary engines. The proposed method demonstrated superior performance compared to the mainstream carbon balance method in detecting vessels with non-compliant sulfur content, achieving detection and false detection rates of 86.60% and 2.06%, respectively. Over a 30-day continuous monitoring period, the fuel sulfur content of 2,743 vessels was successfully determined, representing an effective detection rate of 82.72%. Among these, 131 vessels were identified as potentially exceeding sulfur limits. Subsequent verification confirmed that 111 vessels used non-compliant fuel, resulting in an assessment accuracy of 84.73%. These findings demonstrate the method's capability to enable real-time monitoring of fuel sulfur content without requiring CO₂ concentration data.

Key words: vessel emissions; sulfur content reverse calculation; fuel consumption; spectral analysis; carbon balance method; Gaussian puff correction model

收稿日期: 2024-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(52202409); 内河航运技术湖北省重点实验室基金(NHHY2022001)资助

通信作者: 王超(1990—), 男, 博士, 研究方向为交通排放与低碳。E-mail: wangchao1990@jit.edu.cn

引用格式: 王超, 李雪瑶, 吴浩. 基于排放扩散特征的在航船舶燃油硫含量监测方法[J]. 中国航海, 2025, 48(4): 183-191.

WANG C, LI X Y, WU H. Study on the method for monitoring the fuel sulfur content of vessels based on emission and diffusion characteristics[J]. Navigation of China, 2025, 48(4): 183-191. (in Chinese)

船舶活动产生的排放物对全球空气质量构成重大威胁,是当前大气污染的重要成因之一。相关统计分析显示,船舶排放的二氧化碳(CO_2)、氮氧化物(NO_x)和二氧化硫(SO_2)占全球人为总排放的比例分别为3%、15%和4%~9%^[1-2],已成为我国沿海和内陆区域大气污染的主要来源^[3-4]。为有效减少船舶污染物排放,交通运输部等相关部门已陆续发布《船舶大气污染物排放控制区实施方案》等相关要求^[5-6]明确指出,船舶在内河区域航行时,使用的燃油中硫含量不得超过0.1%(质量分数)^[7-8]。因此,发展高效的实时监测技术,精准识别在航船舶 SO_2 排放及燃油硫含量超标情况,确保排放控制区域政策的顺利落实和执行效果具有决定性作用。

目前,船舶排放污染物的浓度检测及燃料含硫量测定主要依赖于激光雷达、光谱分析设备、便携式多气体检测仪器等技术手段^[9-12]。激光雷达虽监测范围广,但成本高昂,维护复杂,更适用于泊位密集的港区;便携式多气体检测设备虽数据准确无误,但需登船操作,专业性要求高,监管覆盖面有限。当前比较主流的两种监测手段是嗅探法和光谱分析,前者已较为完善,属于一种非主动式检测方式,其效果与被测设备及污染源的空间分布密切相关,阈值设定存在较大难度,因此该方法更适合于常年主导风向为海洋陆地交汇区域的港口。光谱分析技术则利用气体成分对特定光谱波段的特征吸收特性,反演其种类与浓度,具备监测范围广、灵敏度高、稳定性强及可检测气体种类多等优势,适用于连续监测需求^[13-14]。

船舶在航行状态下,烟气排放具有随机性与分散性,难以精确捕捉。因此,建立适用于小尺度的在航船舶烟气扩散模型,对于揭示实际航行环境中船舶烟气的浓度分布规律至关重要^[15]。高斯烟团模型通过引入泄漏时间参数来优化其对污染物扩散过程的模拟精度,能够有效描述污染物在瞬时泄漏条件下的扩散行为。相较于其他高斯模型,该模型更贴合烟气的瞬时扩散特性,适用于计算短期排放情景^[16-17]。

此外,构建精确的燃油硫含量超标识别方法对排放控制区的有效监管具有重要意义^[18]。在现有方法中,由国际海事组织推荐的碳平衡法是较为常见的手段,其原理是基于船舶烟气中 SO_2 与 CO_2 的浓度比值来推算硫碳比,进而确定硫含量。

当前国内外相关研究显示,针对船舶尾气污染物排放与燃油硫含量之间的关系分析已逐渐成为学术界的重要议题并受到广泛关注。但仍存在以下

问题亟待解决:首先,现有反算方法多依赖于硫碳比,在难以准确获取 CO_2 监测数据的情况下,亟须建立一种仅利用 SO_2 排放源强即可实现燃油硫含量识别的技术途径;其次,环境背景中固有的高浓度 CO_2 会对硫碳比方法的准确性产生显著干扰,尤其在监测值与背景值接近时,计算误差尤为突出;然后, SO_2 与 CO_2 的监测值通常需通过同步出现的明显浓度波峰来确定,具有一定主观性。当信号同步性差导致波峰形态不一致时,往往只能采用波峰面积进行近似计算;最后,目前现有的高斯扩散模型在对船舶烟气排放源的风速等关键参数进行修正时仍存在不足,尤其是在有效高度、扩散系数等核心参数方面。鉴于此,本文基于监测点获取的 SO_2 扩散浓度,基于优化后的高斯烟团扩散模型,对船舶排放的污染物强度进行数值模拟与估算。同时基于船舶的初始数据计算出的燃油消耗量,设计了一种无需依赖碳排放浓度参数的船舶在航状态下燃油硫含量反演技术。

1 研究方法

本文提出的方法包括两个步骤:1)基于 SO_2 监测浓度数据,利用高斯烟团扩散模型进行源强反算;2)基于计算得到的 SO_2 排放源强,依据船舶燃油消耗数据,设计无需依赖二氧化碳排放量的硫含量计算模型。

1.1 高斯烟团扩散模型

高斯扩散模型基于污染物浓度呈正态分布的假设,适用于中、小分子量气体的扩散模拟,其适用尺度与船舶烟气排放监测场景相符。高斯烟团模型将船舶在特定时刻排放的烟气近似视为瞬时释放的点源,能够合理描述船舶移动过程中烟气瞬时排放的非稳态扩散过程。因此,该模型更擅长捕捉烟气的瞬时扩散特征,尤其在考虑船舶运动、风速变化等动态因素时,通过将连续排放离散为一系列瞬时烟团,可以更精确地模拟烟气排放后短时间内的扩散行为,从而更真实地反映实际状况。

高斯烟团模型中船舶移动排放源与监测点示意图,如图1所示,船舶烟气排放可简化为一个沿水平直线移动的瞬时点源。由于每个烟团在时间上是瞬时的,在空间上呈离散分布,这种特性使得高斯烟团模型能够更好地表征船舶烟气扩散的瞬时性与空间非均匀性。因此,该模型适用于瞬间或短期排放情形,并强调了时间维度对污染物浓度变化的影响。

高斯烟团模型假设污染物以特定体积或质量在瞬间释放至大气,释放后涉及水平和垂直方向的扩

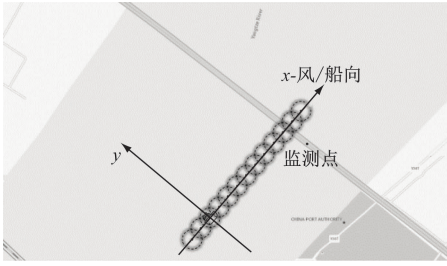


图1 船舶移动排放源与监测点示意

Fig.1 Schematic diagram of vessel emission source and monitoring point

散,能够较好地模拟污染物扩散的初始阶段。基于此,高斯烟团扩散模型可表述为:

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z - \mu_H}{\sigma_z} \right)^2} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2} \cdot \left[e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - H}{\sigma_x} \right)^2} + e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x + H}{\sigma_x} \right)^2} \right] \quad (1)$$

式(1)中, $C(x, y, z, t)$ 表示下风向某监测点的船舶 SO_2 扩散浓度, kg/m^3 ; Q 表示船舶烟气的排放源强度, kg/s ; σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为 x (下风向)、 y (横风向)、 z (垂直方向)的扩散系数; t 为船舶烟气排放源的排放时间,即船舶行驶时间, s ; H 为排放源的有效高度, m ; μ_H 是有效高度处的风速,即船舶烟囱出口处的风速, m/s 。

在船舶烟气扩散过程中的风速、排放源高度等变量不仅影响尾气的扩散范围和浓度分布,还决定了其对环境的潜在影响。因此,在气象环境复杂、船舶流动分散的实际排放环境中,需要基于船舶烟气的排放特征进行修正。

1) 排放源有效高度修正

随着排放源高度的增加,烟气在大气中的稀释作用也随之增强,导致监测面污染物浓度显著降低。这种效应在不同类型的船舶和排放源高度中表现得尤为突出。排放源高度分别为0 m、10 m、20 m和30 m的船舶烟气扩散效果,如图2所示。结果表明,排放源高度为10 m时,尾气浓度峰值最大,随着排放源高度的增加,尾气浓度峰值逐渐减小。这是由于高排放源的船舶烟囱高度较大,排放的尾气在大气中具有更大的稀释空间,从而降低了监测面的污染物浓度。而低排放源的船舶,由于烟囱高度较低,排放的尾气在扩散过程中容易受到影响,导致监测面浓度较高。

排放源的有效高度可表示为:

$$H = H' + \Delta h \quad (2)$$

$$\Delta h = \frac{1.6 F^{\frac{1}{3}} x^{\frac{2}{3}}}{\mu_H} \quad (3)$$

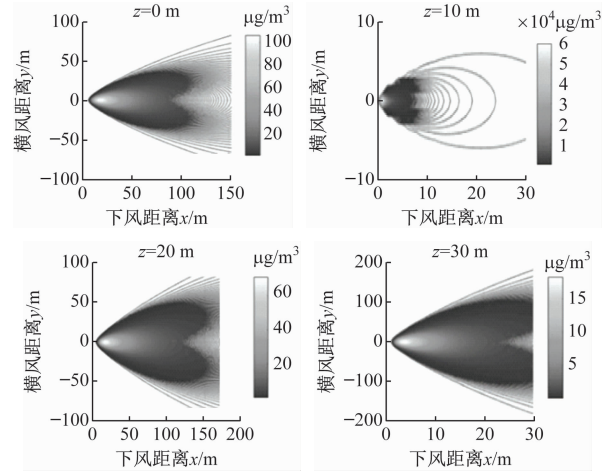


图2 不同排放源高度的船舶烟气扩散效果

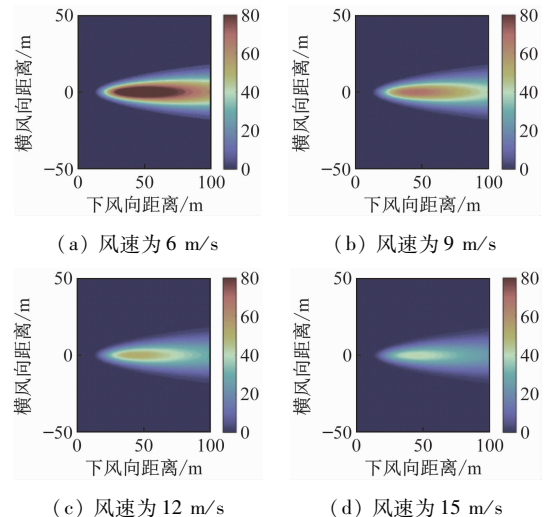
Fig.2 Vessel exhaust diffusion with different emission source heights

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_s \times (T_s - T_a) g}{T_s} \cdot D^2 \quad (4)$$

式(2)~(3)中, H' 为船舶烟囱的几何高度, m ; Δh 为船舶烟气的抬升高度, m ; F 为浮力参数, m^4/s^3 ; x 是下风向某点距释放源的距离, m ; V_s 为船速, m/s ; T_s 为排放源的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_a 为环境大气温度, $^{\circ}\text{C}$; D 为排放口直径, m ; g 为重力加速度, $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ 。由于船舶烟气抬升高度的计算需要较多参数,实际数据的不足,导致其获取难度较大,这在很大程度上限制了研究的推进,可采取文献中推荐的数值^[19]。

2) 有效高度处风速修正

风速至关重要,直接影响到尾气污染物的扩散行为。从图3可以看出,风速较高时,尾气浓度峰值较低,尾气扩散更迅速,浓度降低速度较慢。而在低风速条件下,尾气浓度峰值较高,扩散范围较小,污染物集中在局部区域。

图3 不同风速的船舶烟气扩散效果
Fig.3 Vessel emission diffusion with different wind speeds

模型中所需的风速是指排放源周围的实时风速,与地面风速存在一定误差,不同高度的风速影响会比较明显,需要对风速进行修正:

$$\mu_H = \mu_g \left(\frac{H}{H_g} \right)^m \quad (5)$$

式(5)中, μ_g 为地面风速,m/s; H_g 为地面风速的监测高度,m; m 为幂次定律常数,由大气稳定度确定。确定大气稳定度是构建任何气体扩散模型的前提和基础,大气稳定度与当地经纬度、观测时间、太阳时/倾/高度角和云量、风速等气象参数均存在显著关联性。具体计算流程为:1)确定太阳时角(借助观测时间和当地经度);2)确定太阳高度角(通过当地纬度、太阳时角及太阳倾角进行推导);3)判定入射等级(依据太阳高度角与云量进行判定);4)针对变化风场,由风速和入射等级,最终确定大气稳定度等级(A-F)。大气稳定度的具体确定方法^[20]。

$$x = d \cdot \frac{\mu_H \cdot \cos(\theta_w - \alpha) - V_s \cdot \cos(\theta_s - \alpha)}{\sqrt{[\mu_H - V_s \cos(\theta_w - \theta_s)]^2 + [V_s \cdot \sin(\theta_s - \theta_w)]^2}} \quad (7)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(L_{o,s} - L_{o,m})}{\cos(L_{a,m}) \cdot \tan(L_{a,s}) - \sin(L_{a,m}) \cdot \cos(L_{o,s} - L_{o,m})} \right) \quad (8)$$

式(7)~(8)中, μ_H 为风速,m/s; V_s 为船速,m/s; d 是船与监测点(桥梁)的距离,m; θ_w 和 θ_s 分别表示风向和船向; α 表示船相对于监测点的方位角; $L_{o,s}$

3) 扩散系数修正

在大气扩散模型中,扩散系数的数值会随着稳定性和风向距离的不同而发生显著变化。通常可以通过试验确定,并在较长距离内视为常数。本文对传统的经验扩散系数方程进行修正,增加了不同方向的扩散系数与指数,可表示为:

$$\sigma_i = \frac{\gamma_{1,i} \cdot x}{(1 + \gamma_{2,i} \cdot x)^{\alpha_i}} \quad i = x, y, z \quad (6)$$

式(6)中, $\gamma_{1,i}$ 和 $\gamma_{2,i}$ 分别为横向和纵向扩散系数; α_i 为扩散指数; $\gamma_{1,i}$ 、 $\gamma_{2,i}$ 和 α_i 的取值可通过 Briggs 扩散系数方程获得^[20]。内河环境相对开阔,船舶烟气扩散情况与非城市区域相似度较高,选取的扩散系数方程如表1所示。 x 代表污染物扩散至下风向方向的距离,m,是指从排放源到指定位置沿风向的水平距离。下风向距离的计算主要基于气象条件和排放源的特征,特别是风速和风向,计算方法如下:

和 $L_{a,s}$ 分别表示船舶的经度和纬度; $L_{a,m}$ 和 $L_{o,m}$ 分别表示监测点的经度和纬度。

表1 Briggs 扩散系数取值

Tab.1 Briggs diffusion coefficient

大气稳定度	$\gamma_{1,x} = \gamma_{1,y}$	$\gamma_{2,x} = \gamma_{2,y}$	$\alpha_x = \alpha_y$	$\sigma_x = \sigma_y$	$\gamma_{1,z}$	$\gamma_{2,z}$	α_z	σ_z
A——强不稳定	0.22	0.000 1	0.5	$0.22x/(1+0.000 1x)^{0.5}$	0.20	0	1.0	$0.20x$
B——不稳定	0.16	0.000 1	0.5	$0.16x/(1+0.000 1x)^{0.5}$	0.12	0	1.0	$0.12x$
C——弱不稳定	0.11	0.000 1	0.5	$0.11x/(1+0.000 1x)^{0.5}$	0.08	0.000 2	0.5	$0.08x/(1+0.000 2x)^{0.5}$
D——中性	0.08	0.000 1	0.5	$0.08x/(1+0.000 1x)^{0.5}$	0.06	0.001 5	0.5	$0.06x/(1+0.001 5x)^{0.5}$
E——较稳定	0.06	0.000 1	0.5	$0.06x/(1+0.000 1x)^{0.5}$	0.03	0.000 3	1.0	$0.03x/(1+0.000 3x)$
F——稳定	0.04	0.000 1	0.5	$0.04x/(1+0.000 1x)^{0.5}$	0.02	0.000 3	1.0	$0.02x/(1+0.000 3x)$

1.2 船舶燃油硫含量反算

在船舶燃油硫含量反算方法中,碳平衡法是比较常见的思路,即通过同步测量船舶烟气的 CO_2 和 SO_2 浓度,基于两者浓度比(硫碳比)反推燃油硫含量:

$$S = 87\% \times \frac{32(c_{\text{SO}_2} - \delta_{\text{SO}_2})}{12(c_{\text{CO}_2} - \delta_{\text{CO}_2})} \quad (9)$$

式(9)中, S 为船舶燃油硫含量; δ_{SO_2} 和 δ_{CO_2} 为 SO_2 和 CO_2 的背景值, kg/m^3 ,是指无船舶烟气影响时的大气中固有浓度; c_{SO_2} 和 c_{CO_2} 为 SO_2 和 CO_2 的监测值, kg/m^3 ,可通过同时形成比较明显的浓度波峰来测量。如果由于信号同步等问题导致波峰形状存在一

定差异,可采用波峰高于基线(即背景值水平线)的面积予以代替。

然而,在无法或不易获取 CO_2 监测浓度的情况下,上述硫碳比方法不再适用。为此,需结合船舶自身特性参数,设计一种无需依赖二氧化碳浓度即可精准推导硫含量的分析技术。船舶燃油中硫化物的含量可通过计算其排放的二氧化硫量与燃料消耗量的比例来体现:

$$S = \frac{Q}{2M} \quad (10)$$

式(10)中, M 为船舶燃油消耗量, kg/s ,可进一步由船舶主机基本耗油系数、主机与辅机的功率值及油

耗数据通过系统进行精确测定并记录:

$$M = p \times A_1 + A_2 \quad (11)$$

$$A_1 = a_1 \times b_1 \quad (12)$$

$$A_2 = a_2 \times b_2 \quad (13)$$

式(11)~(13)中, p 代表主机基本耗油系数,具体数值根据船舶类型不同而有所差异:液化气运输船采用0.7,货船取值范围为0.8至0.9,集装箱船同样遵循这一区间,拖船则选取0.5到0.7之间,而客轮的燃料消耗系数则设定为1.0。 A_1 和 A_2 分别为主机和辅机燃油消耗量,kg/h; a_1 和 a_2 分别为主机

和辅机功率,kW; b_1 和 b_2 分别为主机和辅机耗油率,kg/kW·h。主机耗油率的取值范围在0.165~0.178 kg/kW·h,辅机耗油率的取值范围在0.019~0.025 kg/kW·h^[21]。若主机功率和辅机功率数据缺失,可基于船舶总吨位,利用多源数据匹配和回归拟合方法获得,如表2所示^[22-23]。船舶总吨位与主机功率回归方程是由CHEN等充分选取了我国长江流域、珠江流域和渤海海域的406 616艘不同类型的船舶形成的,具有较强的代表性。

表2 船舶总吨位与主机、辅机功率的关联性分析

Tab. 2 Regression function between gross tonnage and main engine power and auxiliary engine power

船舶类型	样本量	回归方程	辅机功率与主机功率比值	R^2
散货船	28 320	主机功率 = 10.051 × 船舶总吨位 ^{0.652}	0.253	0.947
油轮	34 026	主机功率 = 4.901 × 船舶总吨位 ^{0.729}	0.342	0.935
集装箱	73 967	主机功率 = 3.191 × 船舶总吨位 ^{0.844}	0.223	0.938
杂货船	13 809	主机功率 = 2.104 × 船舶总吨位 ^{0.838}	0.238	0.802
拖船	40 346	主机功率 = 74.340 × 船舶总吨位 ^{0.563}	0.126	0.746
化学品运载船	28 147	主机功率 = 2.622 × 船舶总吨位 ^{0.817}	0.363	0.929
液化气运输船	39 165	主机功率 = 24.627 × 船舶总吨位 ^{0.584}	0.337	0.933
滚装船	67 838	主机功率 = 69.865 × 船舶总吨位 ^{0.558}	0.277	0.731
客轮	80 998	主机功率 = 26.769 × 船舶总吨位 ^{0.458}	0.079	0.746

2 结果与讨论

在前期的工程应用中,装备有光谱分析遥测系统的船舶烟气污染物排放监测设备已于2021年在江阴大桥等监测断面安装完成。在江阴大桥监测断面,发射端安装于上下行航道分界线第40号悬索处,接收端安装于上行航道北侧边界第7号悬索处,光路约380 m,可实现上行船舶的全覆盖监测,如图4所示。



图4 航道监测断面设备布设示意

Fig. 4 Schematic diagram of equipment layout position

采集的数据主要包括船舶SO₂排放浓度实测数据,航行状态数据涵盖船舶的动态参数,包括位置坐标(经纬度)、航行速率、加速度值以及转向角度等;而船舶静态属性则包含唯一的船舶识别代码——MMSI编号、船舶长度、船舶类型、船舶数量、排放源

即排气管高度)和天气气象数据(风速、风向)等。其中,风向和风速数据可借助风向风速仪获取。

为更直观地展示并验证本方法在船舶燃油硫含量计算中的实际应用效果,本章节将在以下三个方面进行分析:1)选取了在实际运行中监测到的硫含量超标船舶(船舶燃油硫含量应小于0.1%,超过0.1%为超标),并经过海事部门携带便携式分析仪器,登船抽油检测后确认超标的案例,旨在系统解析不依赖二氧化碳浓度的在航船舶燃料硫含量计算方法的具体操作流程;2)根据海事部门提供的97艘豁免船只信息,在这些船舶运行到监测断面时,实际测得排放浓度并反算出硫含量,用以验证本方法的有效性和准确性;3)随机选择一个月,展示本船舶烟气监测设备连续30天的实际监测效果,用以说明本方法的实用性。

2.1 硫含量超标船舶案例计算

2022年3月17日上午7时51分左右,江苏省无锡市江阴大桥监测断面上行航道监测到某船舶SO₂浓度为59.5 μg/m³,此时地面风速为3.1 m/s,系统依据此数据判定该船为超标嫌疑船只并触发警报。随后,海事部门工作人员登船取样检测其燃油,最终证实该船舶的燃油硫含量超出标准限值。接下

来将系统分析该案例的计算步骤:

首先明确大气稳定度参数。该监测断面所在经度为 $120^{\circ}16'38.28''E$, 纬度为 $31^{\circ}56'17.88''N$ 。则观测时间的小时部分 $t = 8$, 观测时间所在日期是一年中的第 $day = 76$, 经度 $\lambda = 120.2773$, 纬度 $\psi = 31.9383$ 。通过分析云量与风速数据, 可判定当前大气处于中性稳定状态, 即 D 级大气稳定度。

然后确定船舶的排放源强。需先通过测算扩散系数, 确定有效高度及对应风速修正参数。根据本案例分析, 下风向距离 $x = 809.9$ m, 借助式(6)和表1, 计算得出扩散系数 $\sigma_x = \sigma_y = 62.3167$, $\sigma_z = 32.6517$ 。这艘船舶属于小型散货船类别, 因此其烟气排放高度修正值设定为 6 米。在有效高度范围内, 风速修正系数需根据地面风速进行调整。当测量点位于距地面 10 m 处时, 该高度处的风速值为 3.1 m/s。根据 D 级大气稳定度的分析结果, 非城市区域的幂次定律常数为 0.15, 结合式(5)可计算出有效高度处的风速修正值为 2.87 m/s。

结合以上参数, 利用高斯烟团扩散模型(公式1)进行反演计算, 得出该船的排放源强度 $Q = 123166 \mu\text{g/s}$, 即 0.1232 g/s 。

通过查阅船舶资料库, 可知该小型散货船的总载重为 500 吨。根据表 2 中列出的回归公式计算, 其主机功率和辅机功率分别为 578 kW 和 146 kW。 ρ 设定为 0.8, 主机耗油率为 $0.172 \text{ kg/kW} \cdot \text{h}$, 辅机耗油率为 $0.022 \text{ kg/kW} \cdot \text{h}$, 利用式(11)到式(13), 计算得到船舶燃油消耗量 M 为 82.7448 kg/h , 即 22.9847 g/s 。

最后, 利用公式 10, 求得该船的燃油硫含量 S 为 0.268%。海事机构对涉案船舶进行了现场抽样分析, 其实际燃油含硫量检测结果为 0.24%, 该检测技术的准确度达到 88.33%。该案例表明, 本方法在不依赖 CO_2 浓度的前提下, 能够较为准确地反算在航船舶的燃油硫含量。

此外, 为了表明高斯烟团模型修正带来的准确度提升, 通过测量未校正的船舶烟气排放源高度数据, 其实际高度为 5 米。地面风速为 3.1 m/s 和扩散系数 $\sigma_x = \sigma_y = 28.4386$, $\sigma_z = 18.6278$, 求得船舶排放源强度 $Q = 151302 \mu\text{g/s}$, 即 0.1513 g/s 。结合船舶燃油消耗量 22.9847 g/s , 计算出船舶燃油硫含量 S 为 0.329%, 准确度为 62.92%。模型修正后, 准确度提升 25.41%。

2.2 豁免船舶的燃油硫含量验证

豁免船特指船舶在燃油的硫含量超标的情况下, 依然可以继续航行, 这一情况通常与特定政策或

法规下的豁免条款有关, 船主需向海事部门提前报备并办理相关通行手续。因此, 可结合海事部门提供的豁免船只信息, 当上述船舶通行至监测断面时, 根据监测到的 SO_2 浓度数据和船舶类型、吨位等信息, 反算出所使用燃油的硫含量。因为豁免船只所使用的燃油硫含量一定超标, 依据计算得出的超标硫含量数据, 对相关船舶进行统计分析, 即可验证硫含量反算方法的有效性和准确性。97 艘豁免船只的燃油硫含量计算结果, 如图 5 所示, 计算出的硫含量最大值为 1.272%, 最小值为 0.001%, 平均值为 0.498%。燃油硫含量主要集中在 0.2% ~ 0.8%, 占比超过 70%。

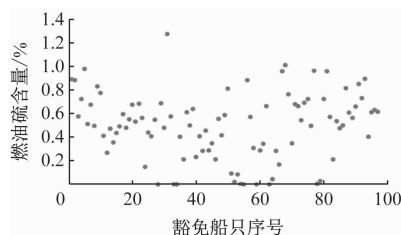


图5 豁免船舶燃油硫含量计算结果

Fig. 5 Fuel sulfur content of the exempted vessels

为了进一步验证本方法可不依赖 CO_2 浓度反算在航船舶的燃油硫含量, 将本方法与现阶段主流的依赖 CO_2 浓度的碳平衡法进行对比, 结果如表 3 所示。由结果可知, 本方法在超标船舶检出率和检测异常率方面的表现均略优于碳平衡法; 在 97 艘豁免船中, 检测出硫含量超标船舶 84 艘, 超标船舶检出率为 86.60%, 高于碳平衡法的 83.51%; 硫含量反算异常率为 2.06%, 低于碳平衡法的 4.12%。上述结果表明, 本文提出的不依赖 CO_2 浓度的船舶燃油硫含量反算方法, 可有效替代现阶段主流的碳平衡法, 对在航船舶燃油硫含量进行实时监测。

表3 本文提出的方法与碳平衡法的结果对比
Tab. 3 Comparison of the proposed method and carbon balance method

对比指标	本方法	碳平衡法
豁免船只数量/艘	97	97
硫含量超过 0.1% 的船只数/艘	84	81
超标占比	86.60%	83.51%
硫含量超过 1% 的船只数/艘	2	4
异常占比*	2.06%	4.12%

* 通过长江江苏段的豁免船舶的燃油硫含量通常不大于 1%。因此, 将硫含量超过 1% 的反算结果认定为异常值。

2.3 实际监测效果评估

为了证明本方法可用于所有船舶的燃油硫含量

反算与超标监测,本节选择了连续30天的实际监测数据反算硫含量,并对超标船只进行识别。数据采集时间为2022年4月1日至4月30日,实时监测频率为5秒。表4为船舶排放监测系统在上述采集时间内获得的样本数据,SO₂浓度的偏度为正值,表明大部分数据集中在平均值的左侧(小于平均值),少数高浓度数据增加了平均值,即当船舶通过时,SO₂浓度会显著增加。

为了进一步表明风向风速对尾气扩散的影响,连续30天监测时间内的SO₂浓度风玫瑰图,如图6所示。结果表明,北风(N)和北北西北(NNW)是该监测断面最常见的风向,风速主要集中在中低风速区间,在此风速区间内,SO₂浓度随着风速的增加而增加,并且在北北西北和北风方向上浓度较高。在东风(E)和南风(S)方向,浓度相对较低,这可能是由于这些风向上没有显著的污染源,或者风速较低,导致污染物传输至监测点的效率较低。此外,较高风速对应的区域显示出更高的SO₂浓度,这是由于高风速能够增加大气的混合程度,将船舶排放的SO₂更快地输送至监测点。高风速的传输效应增强了污染物的扩散和稀释,但由于源头浓度较高,最终在监测点的浓度也较高。而在低风速条件下,大气混合较少,排放的污染物可能会在源头附近积累,导致监测点的浓度较低。

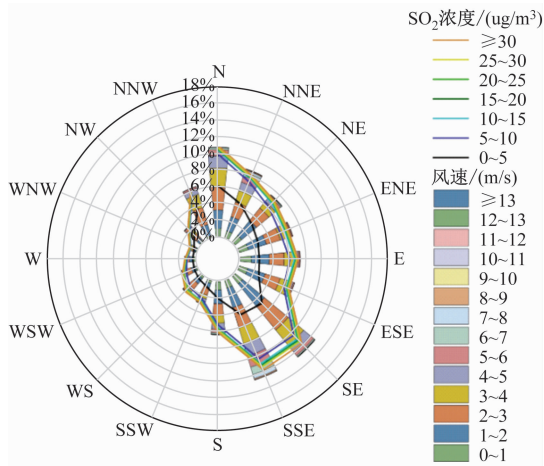


图6 连续30天监测时间内SO₂浓度风玫瑰图
Fig. 6 Wind rose diagram of SO₂ concentration for 30 consecutive days

在30天内,共有3316艘船舶通过该监测断面,检测出2743艘船舶的燃油硫含量,有效检出率为82.72%。在检测到燃油硫含量的2743艘船舶中,有131艘涉嫌超标,这些可疑船舶包括84艘豁免船和47艘未申请豁免的船舶。由相关监管人员在船舶上采集样本后,进行含硫量成分的检测分析,

共有111艘船舶使用了硫含量超标的不合格燃油,检测准确率为84.73%。根据相关的国内外文献,运行在瑞典与丹麦间的船舶遥感监测系统的有效检出率为27%^[24],运行在天津港岸基的船舶排放监测系统在2020年5月至2020年9月期间的有效检出率为66.20%^[25],均低于本方法的检出率。本文对内河航线船舶和远洋运输船舶没有区分,采用的燃油硫含量监测方法对上述船舶同样适用。在长江江苏段内河航道,同时具有内河航线船舶和远洋运输船舶,由监测数据可知,上述两种船舶的检出效果无明显差异。

此外,仍有573艘船舶未有效检测出燃油硫含量,原因可能为:1)当多艘船只同时通过监测断面时,系统无法准确地将监测浓度与船只进行有效匹配;2)船舶动静态监测数据的缺失;3)大风等恶劣天气的影响。当风速过大,如超过10 m/s达到5~6级以上时,风速会对本方法的效果造成较大影响。

表4 船舶排放监测系统样本数据采集

Tab. 4 Data categories collection of vessel emission system

数据类型	样本量	最大值	最小值	平均值	偏度
SO ₂ 浓度/ $\times 10^{-9}$	367 846	99.67	0.38	8.22	5.752
航行速度/(km/h)	125 125	24.82	7.22	14.82	1.069
航向角/(°)	125 125	280	223	245	3.954
风向/(°)	384 753	360	0	148	0.631
风速/(km/h)	384 753	43.92	0.36	12.24	2.033
总云量	720	10	0	6.19	-0.504
低云量	720	10	0	1.83	1.684

3 结束语

1) 通过对实际监测到的超标船舶案例进行计算分析,结果表明本方法反算的燃油硫含量为0.268%,经登船抽样验证实际值为0.24%,计算准确度达到88.33%。基于97艘豁免船只的监测数据对比分析显示,本方法在超标船舶检出率和检测异常率方面均优于碳平衡法,分别达到86.60%和2.06%。

2) 在为期30天的连续监测中,面对总计3316艘通行船舶,本方法成功对2743艘船舶实现了燃油硫含量检测,有效检出率为82.72%。在检出船舶中,共识别出131艘涉嫌硫含量超标,经最终确认其中111艘确属不合格,检测准确率为84.73%。

3) 本方法可作为现有碳平衡法的有效替代方法,通过无需依赖二氧化碳浓度的实时监测技术,对航行中的船舶燃油硫含量进行精准监控。然而,当

多艘船只同时通过监测断面时,系统对监测浓度与船舶的准确匹配仍面临挑战。此外,恶劣气象条件可能对监测效果产生较大影响,研究团队将在未来研究中着重关注上述问题。

参 考 文 献

- [1] 彭鑫,文元桥,肖长诗,等. 船舶废气排放扩散模拟计算方法研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(1): 255-264.
PENG X, WEN Y Q, XIAO C S, et al. Improved calculation model for ship exhaust emission dispersion [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(1): 255-264. (in Chinese)
- [2] 林博闻,马晓凤,庄义彬. 港口船舶尾气排放量及泊位调度优化研究[J]. 中国航海, 2024, 47(1): 88-96.
LIN B W, MA X F, ZHUANG Y B. Optimization of berth scheduling to control ship exhaust emissions in port [J]. Navigation of China, 2024, 47(1): 88-96. (in Chinese)
- [3] 陈命男,朱健,王珊珊. 基于长光程 DOAS 技术的航道区域船舶空气污染物排放监测研究[J]. 大气与环境光学学报, 2021, 16(2): 98-106.
CHEN M N, ZHU J, WANG S S. Monitoring of ship emission in shipping channel area based on long-path DOAS technique [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2021, 16(2): 98-106. (in Chinese)
- [4] ZHAO J, ZHANG Y, PATTON A, et al. Projection of ship emissions and their impact on air quality in 2030 in Yangtze River delta, China [J]. Environmental Pollution, 2020, 263: 114643.
- [5] 交通运输部. 船舶大气污染物排放控制区实施方案[Z]. 交海发[2018]168号, 2018-11.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Implementation Plan for Ship Air Pollutant Emission Control Areas[Z]. Document Jiao Hai Fa[2018] No. 168, November 2018.
- [6] 中华人民共和国生态环境部. 船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法(GB15097—2016)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Limits and measurement methods for exhaust pollutants from marine engines (GB 15097—2016) [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016.
- [7] 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.
- [8] 王征,刘瑛,彭传圣,等. 船舶排放监管演化博弈分析与监管对策研究[J]. 中国航海, 2023, 46(1): 127-135.
WANG Z, LIU Y, PENG C S, et al. Game theory analysis on evolution of ship emission supervision and strategy to succeed[J]. Navigation of China, 2023, 46(1): 127-135. (in Chinese)
- [9] 刘罡,吕佳明,牛文兴,等. 高光谱成像的船舶燃油硫含量遥测技术[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(6): 1697-1702.
LIU G, LYU J M, NIU W X, et al. Detection of sulfur content in vessel fuel based on hyperspectral imaging technology [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(6): 1697-1702. (in Chinese)
- [10] 陶力,周凡. 基于动态时间规整的尾气估算船舶燃油硫含量方法[J]. 传感技术学报, 2023, 36(5): 769-775.
TAO L, ZHOU F. Method for estimating the sulfur content of ship fuel by gas based on dynamic time warping[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(5): 769-775. (in Chinese)
- [11] 邓孟涛,向元京,胡豪杰,等. 船舶尾气监测无人机系统设计与应用[J]. 中国航海, 2024, 47(1): 139-154.
DENG M T, XIANG Y J, HU H J, et al. Design and application of UAV system for ship exhaust monitoring [J]. Navigation of China, 2024, 47(1): 139-154. (in Chinese)
- [12] 胡健波,朱建华,彭士涛,等. 通过尾气估算船用燃油硫含量的跟船嗅探法实验[J]. 水道港口, 2019, 40(4): 450-455.
HU J B, ZHU J H, PENG S T, et al. On-board test of sniffing method to estimate sulfur content in marine fuel through in situ measurements of ship emissions [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2019, 40(4): 450-455. (in Chinese)
- [13] 刘义铭,张艳,袁志鹏,等. 基于船舶实时排放和烟羽在线监测的燃油硫含量识别方法研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(7): 2624-2632.
LIU Y M, ZHANG Y, YUAN Z P, et al. Identification of sulfur content in marine fuel oil based on real-time ship emissions and online monitoring of plumes [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(7): 2624-2632. (in Chinese)
- [14] 高庆燕. 高斯模式下的内河在航船舶尾气排放源强反算研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
GAO Q Y. Research on Inverse Estimation of Exhaust

- Emission Intensity from Inland Navigating Ships Based on Gaussian Model[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [15] 刘瑜. 台架测试的船用柴油机废气排放污染度监测系统[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(3): 92-95.
LIU Y. Marine diesel engine exhaust emission pollution monitoring system tested by bench[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(3): 92-95. (in Chinese)
- [16] NICOLETTA L, SOFIA D, GIULIANO A, et al. Pollution dispersion from a fire using a Gaussian plume model[J]. International Journal of Safety and Security Engineering, 2020, 10(4): 431-439.
- [17] 冯崧, 曾祥进, 黄瑜豪. 改进高斯烟团模型的多气体源泄露扩散模型[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(31): 13619-13625.
FENG S, ZENG X J, HUANG Y H. Multi-gas source leakage diffusion model based on improved gaussian puff model[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(31): 13619-13625. (in Chinese)
- [18] CAO K, ZHANG Z, LI Y, et al. Surveillance of ship emissions and fuel sulfur content based on imaging detection and multi-task deep learning [J]. Environmental Pollution, 2021, 288: 117698.
- [19] 唐豪. 基于高斯模型的在航船舶尾气扩散研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
TANG H. Study on Exhaust Gas Diffusion of Navigating Ships Based on Gaussian Model [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [20] WU H, WANG C, CHEN E, et al. Development of a spectrum-based ship fuel sulfur content real-time evaluation method[J]. Marine Pollution Bulletin, 2023, 188: 114484.
- [21] 李胜. 船舶主机降速节能研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011.
LI S. Research on Energy Saving by Slowing Down Speed of Marine Main Engine [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011.
- [22] CHEN D, WANG X, LI Y, et al. High-spatiotemporal-resolution ship emission inventory of China based on AIS data in 2014 [J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 776-787.
- [23] 张志炜, 黄志炯, 徐媛倩, 等. 基于 AIS 轨迹修复的船舶排放空间表征改进方法与应用[J]. 环境科学学报, 2020, 40(6): 1931-1942.
ZHANG Z W, HUANG Z J, XU Y Q, et al. Ship emissions spatial characterization improved method and application based on AIS trajectory restoration[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(6): 1931-1942. (in Chinese)
- [24] BALZANI LOOV J, ALFOLDY B, GAST L, et al. Field test of available methods to measure remotely SO_x and NO_x emissions from ships [J]. Atmospheric Measurement Techniques Discussions, 2013, 7(8): 2597-2613.
- [25] QI S, WANG J, ZHANG X, et al. Research on monitoring method of fuel sulfur content of ships in Tianjin Port[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2009(1): 012073.