况 晨,李 众,赵梦迪,等.海盐气溶胶源函数的研究综述 [J]. 中国环境科学, 2025,45(11):5992-6006.
Kuang C, Li Z, Zhao M D, et al. A review of research on sea salt aerosol source functions [J]. China Environmental Science, 2025,45(11):5992-6006.

海盐气溶胶源函数的研究综述

况 晨[1],李 众[2],赵梦迪[3],付冬梅[1,3*],林德源[4] (1.北京科技大学自动化学院,北京 100083；2.北京科技大学新材料技术研究院,北京 100083；3.北京科技大学顺德研究生院,广东 佛山 528300；4.国网福建省电力有限公司电力科学研究院,福建 福州 350003)

摘要：海盐气溶胶在气候调节、大气化学反应以及云凝结核形成过程中发挥关键作用.准确量化其产生通量并构建有效的海盐气溶胶源函数模型,对于气候模拟和环境评估具有重要意义.系统回顾了当前主要的海盐气溶胶源函数估算方法,包括白浪覆盖法、稳态干沉降法与微气象法等,综合分析了风速、水温、盐度和波浪状态等关键环境因子对海盐气溶胶生成的影响,并整理总结了不同方法下的海盐气溶胶源函数表达式.综合现有文献发现目前的源函数模型难以适用于全球.未来可结合深度学习与遥感、再分析数据,有望构建全球化的海盐气溶胶源函数模型.

关键词：海盐气溶胶；气溶胶通量；源函数；环境因子
中图分类号：O648.18 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)11-5992-15

A review of research on sea salt aerosol source functions. KUANG Chen[1], LI Zhong[2], ZHAO Meng-di[3], FU Dong-mei[1,3*], LIN De-yuan[4] (1.School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083, China；2.Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology, Beijing 100083, China；3.Shunde Innovation School, University of Science and Technology Beijing, Foshan 528300, China；4.State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350003, China). *China Environmental Science*, 2025,45(11)：5992~6006

Abstract：Sea salt aerosols is critical particles in natural world that influence climate regulation, chemical processes of atmospheric, and cloud condensation nuclei formation. Accurate quantification of emission fluxes in these three areas and the development of reliable source function models are essential for climate modeling and environmental assessment. In this paper, major sea salt aerosol source function estimation methods, including the whitecap coverage method, the steady-state dry deposition method, and micrometeorological approaches, were reviewed, and environmental variables such as wind forcing, wave breaking intensity, water temperature, and surface organic enrichment in sea salt aerosol generation were analyzed. In addition, the main source function formulations derived from different methods are summarized. Recent literature indicates that current source function models cannot be widely applied at the global scale. It is expected that future studies will integrate deep learning techniques with remote sensing and reanalysis datasets to develop widely applicable source function models of sea salt aerosols.

Key words：sea salt aerosol；aerosol flux；sourcefunction；environmental variables

随着全球气候变化问题的日益严峻,海盐气溶胶(SSA)作为大气中重要的天然颗粒物,受到广泛关注.为了准确评估 SSA 的环境影响,亟需量化 SSA 生成通量,而海盐气溶胶源函数(SSSF)正是实现这一目标的关键模型.为此,本文对当前 SSSF 的估算方法及其发展进行系统综述.

然而,现有的 SSSF 通常假设其具备全球适用性,大多建立在理想化假设与风速主导的经验修正之上,难以准确刻画环境因子间的相互影响.这些前提限制了模型在复杂海洋环境中的适用性与预测精度,也成为 SSSF 泛化能力的重要影响因素.近年来,人工智能方法在气溶胶建模中的潜力逐渐显现,为突破这一局限提供了新的研究思路.

1 简述

海洋覆盖了地球表面超过 70%的面积,由空气与海水相互作用产生的海盐气溶胶(SSA)是大气气溶胶的主要来源[1-3].在一部分文献中也将其称为海雾气溶胶(SSA)[4],本文统一使用海盐气溶胶,以下简称为 SSA.

收稿日期：2025-04-16
基金项目：国家重点研发计划(2024YFF0728900);国家自然科学基金资助项目(52401074)
* 责任作者, 教授, fdm_ustb@ustb.edu.cn

SSA 作为大气最主要的自然源气溶胶之一[5],能够对气候环境以及人类活动产生影响[6].1)吸收和散射太阳辐射,改变地球的辐射收支[7-8];2)作为云凝结核直接影响云的寿命和性质,从而影响降雨和大气热辐射平衡[9-10];3)作为氯离子来源,对海洋及沿海地区基础设施、船只、重大设备、土壤以及建筑等造成腐蚀[11-13];4)影响沿海地区空气质量[14].因此,准确预测 SSA 的生成具有重要意义.

海盐气溶胶(SSA)主要通过气泡破裂和波峰撕裂产生[15].当风速超过一定阈值,风应力引发波浪破碎并形成气泡[16].气泡在海面破裂产生两类 SSA:薄膜滴和喷射滴.薄膜滴源自气泡帽的薄膜破裂,粒径通常小于 1μm,数量较多;剩余气泡腔塌陷形成喷射滴,粒径一般大于 1μm,数量较少[17-18].风速进一步增强时,波峰可被湍流撕裂,产生飞沫液滴,显著增加大粒径 SSA 的通量[19].此外,水花飞溅也可能产生飞溅液滴,但其粒径较大,沉降迅速,对 SSA 通量的贡献有限.为准确表征 SSA 从海洋表面释放到大气中的过程,通常采用海盐气溶胶源函数(Sea Salt Aerosol Source Function, SSSF)进行量化.SSSF 是一种数学模型,用于描述 SSA 产生的通量,常以海洋表面 10m 高度为基准[20].

早在 1953 年,Woodcock[21]就已关注 SSA 的相关影响.1978 年,沈志来[22]对我国 SSA 的分布规律与特点展开了研究.Monahan[19]首次构建了基于白浪覆盖法的 SSSF,为 SSA 的定量估算奠定了基础.此后,研究者们持续拓展其物理机制、估算方法与参数化表达,推动该领域的不断发展,正如图 1 所示.在 Web of Science 数据库中以“sea salt aerosol flux” or “sea salt aerosol flux”为主题词进行联合检索,结果如图 2 所示,可以发现在全球气候变化背景下,对 SSA 通量研究的关注日益增强.



图 1　海盐气溶胶源函数(SSSF)研究的关键发展历程

Fig.1　Key development milestones in sea salt source function(SSSF) research

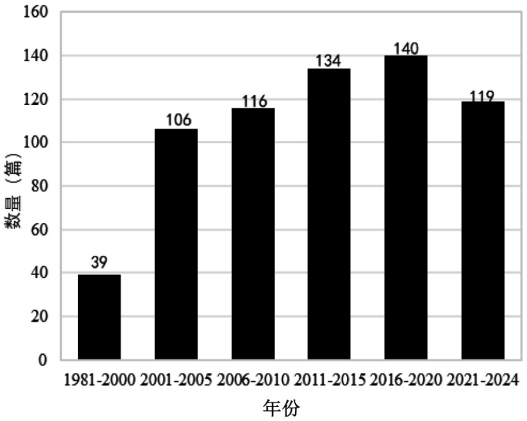


图 2　按时间分组的相关文献数量分布

Fig.2　Distribution of related literature by time

数据来源:Web of Science

随着人工智能技术的不断进步,深度学习在大气气溶胶研究中的应用日益广泛,已在气溶胶反演、浓度估算与粒径分布建模等方面展现出良好潜力[24].不过,现有研究多集中于陆地区域,对海洋环境中的应用相对有限.与此同时,随着观测手段的发展,MODIS、CAMS 等数据平台提供了高时空分辨率的气象与气溶胶数据,为深度学习在气溶胶方向的研究奠定了坚实的数据基础,人工智能方法的进步与高分辨率观测数据的不断积累,共同为海盐气溶胶源函数(SSSF)的模型优化提供了新思路.在此背景下,本文系统梳理了 SSSF 推导方法的理论依据、适用范围及环境因子的影响机制,进一步总结了近年来基于不同数据与建模方法构建的 SSSF 表达式,旨在为未来 SSSF 的优化提供理论参考与方法借鉴.

2　海盐气溶胶源函数的估算方法

海盐气溶胶源函数(SSSF)用于量化海洋表面释

放到大气中的气溶胶产生通量,定义为单位海表面积、单位时间、单位粒径区间内生成的气溶胶数量通量,常用$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}D_\mathrm{p}}$或$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{dlog}(D_\mathrm{p})}$表示,其中 F 为气溶胶释放总量,D_p 是干颗粒的直径.也有研究采用$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}r_{80}}$或$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{dlog}(r_{80})}$描述,其中 r_{80} 是相对湿度为 80%时的 SSA 颗粒半径.不同粒径之间可通过如下经验公式转换[25].

$$D_\mathrm{p}=r_{80}=0.5D_{80}=2r_d=0.5r_0 \tag{1}$$

式中:r_d 是干颗粒半径;r_0 是颗粒释放时的半径.

由于 SSA 粒径分布具有多模态特征,薄膜滴和喷射滴粒子分别对应不同的生成机制,因此海盐气溶胶源函数常以多个对数正态分布函数叠加进行描述[26],以更准确描述其粒径结构.本章将从理论角度出发,介绍几种主要的 SSSF 估算方法.

2.1 白浪覆盖法

白浪覆盖法是最早用于估算海盐气溶胶源函数(SSSF)的方法[19],通过测量白浪覆盖率 W,结合实验或野外观测数据,利用式(2)得到SSSF.根据白浪的生成方式,白浪可分为连续白浪(白浪持续不断地生成)和离散白浪(当波浪破碎才产生白浪)[27].由于自然海况下连续白浪较为少见,现有研究通常基于离散白浪来估算 SSSF,公式如下:

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}D_\mathrm{p}}=\frac{W}{\tau}\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}D_\mathrm{p}} \tag{2}$$

式中:τ是单位白浪衰减时间;E 是单位白浪区域下产生的气溶胶数;$\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}D_\mathrm{p}}$表示单位白浪区域、单位粒径区间内生成的气溶胶数量通量.

白浪法通常假设,无论是在实验室条件下还是在海洋环境中,单位白浪区域产生的海盐气溶胶通量是相同的,即$\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}D_\mathrm{p}}$在不同白浪区域是通用的.这一假设使得实验室测量结果可以用于开放海洋环境.然而,实验室环境受设备和时间的限制,仅能在短时间和小范围内模拟白浪,而开放海域的白浪可能持续数小时并覆盖更广阔的区域,两者在时空尺度上存在显著差异,会影响实际上的准确性.

白浪覆盖率(W)的测定主要依赖人为观察,这种方式往往受到主观因素的影响,且在时间和空间上存在一定的局限性.然而,随着遥感技术的不断进步,现在能够获得长期稳定的数据,具有较高的空间分辨率,可以有效克服传统方法的局限性[28].同时随着深度学习的不断发展,已有研究采用深度学习的方法对 W 进行计算,有效减少了人为误差,提升了对白浪覆盖率的计算精度[29].

2.2 稳态干沉降法

干沉降是移除大气颗粒物的重要途径[30],稳态干沉降法基于以下假设:在给定时间和位置上(不考虑降水的影响),SSA 颗粒的生成速率与通过干沉降移除的速率相等,达到平衡状态.基于稳态干沉降法的源函数表达式为:

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}D_\mathrm{p}}=v_\mathrm{d}\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}D_\mathrm{p}} \tag{3}$$

式中:v_d 是粒子干沉积速率;$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}D_\mathrm{p}}$是气溶胶的粒径分布,为单位体积、单位粒径范围 SSA 数量浓度;N 是单位体积下总的 SSA 数量浓度.

对于粒径小于 1μm 的 SSA 颗粒,由于其质量较小,容易被空气湍流携带并长时间悬浮,干沉积速率较低.因此采用干沉降法估算小粒径 SSA 颗粒产生通量时,会存在较大的误差.

2.3 微气象法

微气象学方法通过测量海洋边界层中气溶胶浓度的梯度或波动,直接测量气溶胶的垂直通量,从而估算海盐气溶胶源函数.主要方法为梯度法和梯度涡度协方差法.

2.3.1 梯度法 梯度法通过采集海洋上方不同高度下的海盐气溶胶(SSA)浓度数据,计算其垂直浓度梯度,并结合 Monin−Obukhov 相似性理论估算 SSA 产生通量[31].该方法假设近表面大气层为中性稳定状态,利用垂直浓度梯度来估算 SSA 的产生通量.此框架下,SSA 浓度的垂直分布满足式(4):

$$N(Z)=N_*\ln(Z)+C \tag{4}$$

式中:Z 是高度;$N(Z)$是该高度下的 SSA 浓度;N_* 是浓度的尺度因子,反映了 SSA 浓度的垂直分布特征;C 是常数.通过不同高度下的浓度拟合得到最佳 N_* 和 C,随后可以用式(5)估算 SSA 产生通量.

$$F=N_*\sqrt{C_D}U_{10} \tag{5}$$

式中:U_{10} 是 10m 高度处的风速;C_D 是拖曳系数.

然而,在使用梯度法估算 SSA 产生通量时,需要假设大气处于中性稳定状态下,即湍流的扩散由风速驱动,而不是由温度梯度引起.该假设在极端气象条件下或温度梯度显著的情况下可能失效,从而影响估算的准确性.其次,梯度法主要适用于半径超过 1μm 的 SSA 颗粒,因为这些颗粒的垂直扩散更为明显.而小粒径气溶胶的扩散过程复杂,梯度法的适用性受到限制.

2.3.2　涡度协方差法　涡度协方差(EC)法,也称涡度相关法,是一种基于湍流理论的微气象学技术,通过高频同步测量垂直风速波动和气溶胶浓度的波动,计算两者的协方差,从而获得气溶胶的产生通量[32].估算公式如下:

$$F = \overline{N' \cdot w'} \tag{6}$$

式中:N'是气溶胶浓度的波动量,w'是垂直风速的波动量,$\overline{N' \cdot w'}$ 是两变量之间的协方差.

相较于稳态干沉降法、白浪覆盖法等间接方法,EC 法不需要依赖参数化模型,可以直接测量 SSA 产生通量.然而,EC 法仅能捕捉湍流扩散主导的通量,在海洋边界层低风速条件下,通量可能会被系统性低估[33].目前,EC 法已广泛应用于评估森林区域的气溶胶沉积通量评估[34].在海洋环境中,SSA 浓度较低,空间分布受波浪破碎强度影响,同时 EC 法对船舶运动状态非常敏感[35],导致该方法在海上应用面临一定挑战.

2.4　空气夹带法

空气夹带法需假设所有吸入的空气都会转化为气泡,并最终都通过气泡破裂释放[36].空气夹带法主要是通过量化风速和海浪破碎能量估算空气夹带通量(F_{Ent}),进而估算海盐气溶胶源函数(SSSF),公式如下:

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}D_{\mathrm{p}}} = F_{\mathrm{Ent}} \cdot 10^{P_N} \tag{7}$$

式中:F_{Ent} 是空气夹带通量,$\mathrm{m^3/(m^2 \cdot s)}$;$P_N$ 是气溶胶粒子的尺寸分布函数,通过数据拟合得到,在不同的条件下,P_N 的具体形式有所不同.

在进行全球范围的 SSA 产生通量预测时,通常需要假设空气夹带通量在全球风浪场中保持不变.然而,这一假设忽略了全球不同区域海洋环境的差异,例如风速、海水温度和波浪状态等的变化等的影响[36-38].随着观测数据的不断收集,空气夹带法需要持续改进和调整以提高预测的准确性.

上述四种海盐气溶胶源函数(SSSF)估算方法,通常依赖于复杂的现场监测设备,操作成本高,且空间代表性有限,往往只能覆盖局部区域,难以适用于全球.

随着人工智能技术的发展,Rudiger[39]通通过收集气象和气溶胶数据,比较了多种机器学习算法,包括支持向量机回归、高斯过程回归和决策树回归等,评估了它们在气溶胶粒径分布预测中的表现.研究结果表明,集成袋装决策树模型在预测精度和训练时间之间表现出最佳平衡,优于传统的经验模型.Wu[40]则利用递归神经网络估算大气气溶胶粒径分布,并使用随机森林模型评估各个特征对预测结果的重要性,在提升预测精度的同时,克服了传统测量方法的局限性.尽管现有研究主要面向陆地气溶胶,但其在处理复杂环境变量与气溶胶之间的非线性关系展现出强大能力,为海盐气溶胶的估算提供了新的可能性.陈兴峰等[24]综述了机器学习在气溶胶定量遥感中的应用,探讨了如何将机器学习方法与遥感机理研究结合.Qiu 等[41]结合卷积神经网络和循环神经网络对 $PM_{2.5}$ 的浓度进行预测,相比于传统的大气化学传输模型具有更高的精度.这些研究进一步拓展了人工智能在气溶胶研究中的应用范围.未来有望借助人工智能强大的特征提取与非线性建模能力,对海盐气溶胶进行高适应性、高泛化性的估算.

3　影响 SSA 产生的相关因素

在早期研究中,风速常作为量化 SSA 产生通量的唯一变量,但随着研究的深入,这种单一参数化方法逐渐暴露出其局限性.越来越多的研究关注海水温度、盐度、波浪状态等环境因素对 SSA 产生的影响,并尝试将其纳入 SSSF 当中,以改进现有参数化方案[42].

3.1　风速的影响

风速作为影响 SSA 产生的最主要因素,通过对海洋表面施加剪切应力导致波浪生成,诱发波浪破碎产生 SSA 颗粒.根据混合长度理论[43],剪切应力 τ 可由式(8)给出:

$$\tau = u_*^2 \rho \tag{8}$$

式中:ρ是空气密度;u_*是摩擦速度又可表示为[44]:

$$u_* = k\frac{\mathrm{u}(z)}{\ln(z/z_0)} \tag{9}$$

式中:$u(z)$是在距离海面 z m 高度处的风速;z_0 是粗糙长度;k 是冯卡尔曼系数,其值通常在0.4左右.尽管波浪是通过风的剪切应力生成,但是一般将其量化为距海面10m 高度处的风速 U_{10} 以此量化 SSA 的产生[20].

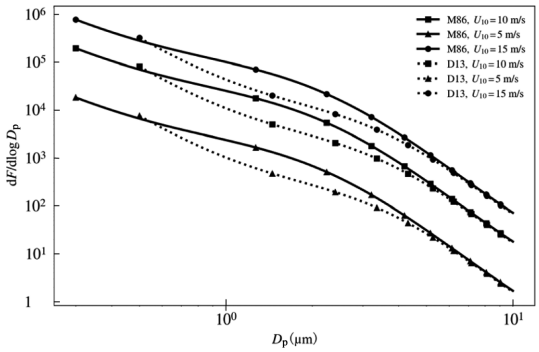


图3 Monahan(M86)[19]和 Demoisson(D13)[45]SSSF 在不同风速下的比较

Fig.3 Comparison of SSSF by Monahan (M86) and Demoisson (D13) at different wind speeds

风速不仅能够直接影响SSA产生,还与白浪覆盖率(W)密切相关.风速越高,波浪破碎程度越剧烈,白浪覆盖率越高,单位时间内能够生成更多的SSA颗粒[4].如图3中所示,随着风速增加,SSA的产生通量明显上升.需要注意的是,在风速低于 3.7m/s 的时候波浪破碎并不明显,通常认为不产生 SSA 颗粒[46].何珍珍[47]的研究中发现 SSA 的产生与风向无关.

目前,大多数 SSSF 参数化方法主要依赖风速的瞬时值,而在 Callaghan[48]的研究中,发现在在风速高于 9.25m/s 时,相同风速下,当风速呈现下降趋势时,SSA 的产生通常比风速上升时更高.Ovadnevaite[49]同样观察到 SSA 浓度变化出现不同的情况,也与这种风速演化过程有关.

风速演化过程对 SSA 产生的影响,可归因于波浪发展与白浪覆盖率的时滞效应.当风速增加时,波浪尚未充分发展,白浪覆盖率较低;风速减少时,波浪已经充分发展,不会立即消失, 而是逐渐消退, 相对来说白浪覆盖率较高,SSA 的产生通量对应增加.因此,在构建 SSSF 参数化方案时,应充分考虑风速演化过程的影响.

3.2 海水温度的影响

Bowyer 等[50]最早在实验室下观察到温度对不同粒径 SSA 产生的影响.当粒径大于 1.5μm 时,SSA 的数量浓度随水温升高而增加,而小于1.5μm时,温度的影响较为复杂.随后的一些研究也探讨了温度对 SSA 生成的影响,但结果存在差异.在 Sellegri 等[51], Sofiev 等[42]和 Mårtensson 等[52],的研究中同样发现了类似的粒径依赖性,由于他们的仪器装置、实验方式等不同,导致在具体温度、粒径上有所区别,但总的都发现对于大粒径的SSA颗粒,其数量随着温度升高而升高;在粒径小于某一值时,SSA 颗粒数量随着温度升高而减少,粒径分布都会朝粒径较大的方向移动.

表 1 不同气泡发生装置下海盐气溶胶(SSA)与温度之间的关系

Table 1 Effect of temperature on SSA under different bubble generators

来源	气泡发生装置	随着温度升高 SSA 颗粒的变化
[51]	烧结玻璃过滤器	D_p<0.07μm 颗粒显著减少 D_p>0.35μm 颗粒增加
[50]	烧结玻璃过滤器	D_p<0.07 数量显著减少 D_p>0.07 的数量增多
[42]	现场研究	0.1<D_p<1μm 颗粒数量减少
[52]	现场研究	SSA 数量浓度增加
[53]	俯冲射流装置	SSA 数量浓度增加
[54]	俯冲射流装置	SSA 数量浓度增加
[55]	俯冲射流装置	SSA 数量浓度降低
[56]	俯冲射流装置	SSA 数量浓度降低,超过一定温度保持不变
[57]	俯冲射流装置	SSA 数量浓度降低
[58]	现场研究	SSA 数量浓度降低
[37]	俯冲射流装置	SSA 数量浓度降低,特别是小粒径颗粒
[59]	俯冲射流装置	SSA 数量浓度降低,特别是小粒径颗粒
[60]	俯冲射流装置	SSA 数量浓度降低
[61]	俯冲射流装置	SSA 数量浓度降低,特别是小粒径颗粒
[62]	烧结玻璃过滤器	SSA 数量浓度降低,特别是小粒径颗粒
	俯冲射流装置	小于 0.3μmSSA 数量浓度先减少再增加,大于 0.3μmSSA 数量浓度无明显规则

在文献[53−55]则表明随着水温的升高,总的 SSA 数量浓度随之增加.值得注意的是,Forestieri[55]使用不同类型的水体进行实验,发现对于 NaCl 水、人工海水水和经过灭菌过滤后的人工海水,SSA 生成量随着水着温度的升高而增加,但在真实海水中并未观察到温度对 SSA 产生的影响.然而众多研究[37,56-62]发现了不同的结果.

这种差异可能源于气泡发生装置的不同,如 Christiansen[63]在不同气泡发生装置下的实验可以看出,以及实验室模拟与现场观测之间的差别.表 1 总结了在不同气泡发生装置下的温海盐气溶胶和温度之间的关系.在部分研究[61-62,64-65]中发现风速、盐度、海洋生物活性无机离子等因素均可能通过物理或生物化学机制,调节温度对 SSA 生成的影响.

表 1 中发现,大多数研究发现温度升高通常抑制小粒径 SSA 颗粒的生成.这可能是较高温度下气泡合并减少,薄膜滴的生成减少,从而抑制了小粒径 SSA 颗粒的形成.鉴于温度对 SSA 生成的显著影响,已有研究尝试将温度作为校正因子引入 SSSF,如表2 所示.后续研究应继续将温度纳入SSSF参数化模型当中.

表 2　温度校正因子

Table 2　Temperature correction factor

研究	温度校正因子
[51]	$\phi_j = a_j T_w + b_j$
[42]	$F_{T_w}(D_p) = \begin{cases} F_{T_w\text{-}25\,^\circ\mathrm{C}}(D_p) = 1 \\ F_{T_w\text{-}15\,^\circ\mathrm{C}}(D_p) = 0.48 D_p^{-0.36} \\ F_{T_w\text{-}5\,^\circ\mathrm{C}}(D_p) = 0.15 D_p^{-0.88} \\ F_{T_w\text{-}2\,^\circ\mathrm{C}}(D_p) = 0.092 D_p^{-0.96} \end{cases}$
[53]	$T_W = 0.3 + 0.1T - 0.0076T^2 + 0.00021T^3$
[58]	$T_W = D_i + C_i T + B_i T^2 + A_i T^3$
[66]	$\mathrm{W}[U_{10}, T_w] = a(T_w)[U_{10} + b(T_w)]^2$

3.3　盐度的影响

盐度通过影响海水的物理性质从而影响 SSA 的产生.在众多研究[51,55,58,66]表明,随着盐度的增加 SSA 的数量浓度会随之增加,粒径分布向较大尺寸方向偏移,Russell 等[68]在不同钠盐溶液下的研究也得出了类似的结论.这可能是因为低盐度条件下,气泡形成较为困难,导致 SSA 的生成量较低;而在较高盐度条件下,气泡难以聚集,更容易生成较小的气泡.May 等[67]Harb 等[69]的研究发现,盐度越高,海水中的小气泡数量越多,这可能是导致粒径分布变化的原因.Zábori 等[60]和 Zinke 等[61]的研究中发现,当盐度超过一定阈值后,SSA 的生成数量和粒径分布趋于稳定.总的来说,盐度能够促进 SSA 的生成.在他们的研究还发现,盐度对 SSA 生成的影响可能具有温度依赖性.因此,在构建 SSSF 时,应考虑盐度与温度的协同影响.然而,在真实海洋环境中,盐度的时空变化通常较小,影响可能远不及风速、温度显著.现有的 SSSF 通常假设在固定盐度下估算 SSA 的产生,如图 4 所示.因此,在参数化过程中,应权衡盐度对 SSA 生成的贡献.

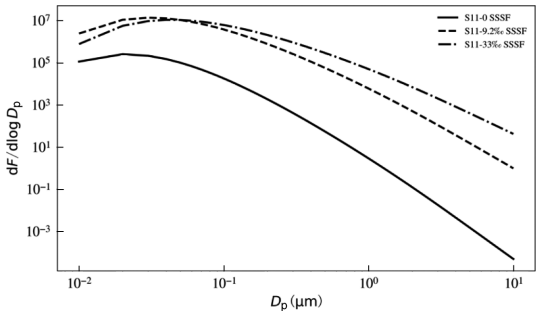


图 4　不同盐度下的海盐气溶胶源函数(SSSF)

Fig.4　SSSF at different salinities

3.4　波浪状态的影响

随着风速的增加,波浪破碎的能量增加,导致更多的海盐气溶胶(SSA)产生.在吴兑[70-71]的研究中发现,波浪高度对 SSA 的产生有一定的影响.Deike[38]在风暴期间的观测发现,风暴初期 SSA 产生高于风暴后期,这是由于海况的变化导致波浪发展阶段的不同. 而传统方法仅依赖风速描述 SSA 生成,无法充分解释波浪破碎过程 SSA 的复杂动态.实际上,波浪的状态,尤其是波龄(通常是波浪相速度与风速的比值),通常对这一过程有重要影响.因此如果将波浪状态参数纳入 SSSF 模型当中,能够提高对 SSA 产生通量预测的准确性.

Zhao[72]发现 SSA 的生成不仅受风速的影响,还受到风浪发展的共同作用,提出将风速与波龄等因素合并为风海雷诺数 R_B,作为描述波浪状态的关键变量.

$$R_B = \frac{u_*^2}{\omega_p \nu} \tag{10}$$

式中:u_*是空气摩擦速度;ω_p 是波浪谱峰值的角频率;ν 是空气运动粘度.

Ovadnevaite[57]通过综合实地观测数据和物理模型,提出将波浪显著高度以及水的运动粘度组合称一个新的雷诺数(Re_{H_W}).

$$Re_{H_W}=\frac{u_* H_S}{v_w} \tag{11}$$

式中:H_s是波浪显著高度;v_w是水的运动粘度.相比于 R_B, Re_{H_W} 使用了水的运动粘度而非空气的粘度,并引入了波浪高度,能够全面地描述波浪的动态特性.

Laussac 等[73]基于气溶胶浓度观测数据,发现波龄通过影响白浪覆盖率(图 5)从而影响 SSA 的生成.Ma 等[74]在热带气旋期间的研究发现,波龄较小时能产生更多的 SSA.Xu 等[75-76]和 Liu 等[77]的研究则指出,波浪陡度比波龄更有效地描述 SSA 的生成过程.而在 Zhao 等[78]的研究发现,在风速小于 25m/s 时,波龄和波浪陡度共同影响 SSA 的生成,但波浪陡度直接决定了 SSA 生成的强度;而当风速超过 25m/s 时,波浪陡度因自然海域的物理限制趋于稳定,波龄成为主导因素.

波浪状态对 SSA 的产生具有显著影响,因此在构建 SSSF 时,应综合考虑风海雷诺数、波龄、波浪陡度、有效波高和谱峰周期等关键波浪状态参数[79],以更全面地描述风浪相互作用对 SSA 生成的影响机制.需特别指出的是,实验室模拟受到波浪生成条件(如风区长度和持续风时的限制)的影响,难以准确反映自然海域中真实的波浪特征.为了提高全球 SSSF 的普适性,未来的参数化模型应结合实测数据,涵盖不同成熟度的波浪,以校正实验室下的偏差.

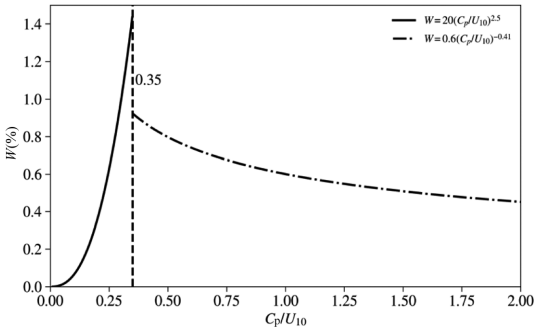


图 5 白浪覆盖率与波龄之间的关系

Fig.5 Relationship between whitecap coverage and wave age

3.5 其他因素的影响

海水中的表面活性物质、浮游植物分泌的有机物等同样能够显著影响 SSA 产生数量,且不同的物质对 SSA 的产生影响不同.一部分研究中发现表面活性物质的存在对 SSA 的产生具备一定的抑制作用;而另外一部分研究中则发现存在一定的促进作用,如表 3 所示.

表 3 其他因素对海盐气溶胶(SSA)产生的影响

Table 3 Influence of other factors on sea salt aerosol (SSA) generation

对 SSA 的影响	表面活性物质	主要结论
对 SSA 的抑制作用	十二烷基硫酸钠[21,51,74,80]	导致 SSA 尺寸分布朝较小的方向移动,但是当 SDS 浓度增高到 6mg/L 以上时,难以评估其影响
	Triton X-100[81]	导致 SSA 尺寸分布向较小的粒径移动,其浓度增加会抑制 SSA 的生成
	琥珀酸[60,65]	显著减少气泡破裂产生的 SSA 颗粒数量,还能降低温度对 SSA 生成的影响
	聚乙烯醇[82]	通常抑制了 SSA 的生成,但是随着浓度的增加,抑制作用减弱;但当聚乙烯醇的分子量达到 600 且浓度较高时,反而会促进 SSA 的生成
对 SSA 的促进作用	油酸[27]	向海水中添加低浓度油酸(0.1 和 1mg/L)会促进 SSA 的生成,但当浓度增加至 10mg/L 时,SSA 数量趋于稳定
	丙二酸[83]	促进 SSA 的产生,浓度越高促进作用越明显,在低浓度时使粒径尺寸减小,而在高浓度时粒径增大
	D-果糖[83]	促进 SSA 的产生,浓度越高促进作用越明显,导致粒径尺寸增大
	丙二酸钠[83]	促进 SSA 的产生,浓度越高促进作用越明显,导致粒径尺寸增大
浮游植物分泌的有机物	—	随着浮游植物释放的有机物浓度增加,气溶胶的粒径分布向更小粒径范围偏移,同时 SSA 的生成数量也显著增加,特别是在小粒径气溶胶范围内[84-87].一些研究还发现,较高的浮游植物浓度反而会抑制气溶胶的生成[64]

注:—表示不属于表面活性物质.

表 3 中可以看出,表面活性物质的类型、浓度甚至分子量都可能会影响 SSA 的产生,且它们的作用可能会随这些因素的变化而发生显著变化.在大部分研究中都是在实验室模拟中,通过控制单一变量

(如表面活性物质的类型、浓度或分子量),观察到明确的剂量效应关系.然而,在浮游植物分泌的有机物中,SSA 产生数量与浮游植物生物活动呈正相关.因此,为了更准确地表征表面活性物质对 SSSF 的实际影响,应该在实验室模拟中加入更接近自然环境的条件.

在以往的研究中,全面观测和量化海盐气溶胶(SSA)产生通量中所涉及的环境因子往往面临数据缺失、获取成本高或空间覆盖有限等问题.因此,对各因子与 SSA 产生通量之间的定量关系仍存在一定不确定性.近年来,随着遥感与再分析技术的持续进步,诸如 MODIS、CAMS 等数据平台已能够提供高时空分辨率的全球气象、海洋与气溶胶相关参数,为系统分析环境因子对 SSA 产生的影响提供了数据基础[88-89].借助这些多源观测数据,未来有望实现对多环境变量影响机制的更深入理解,进而为海盐气溶胶源函数的优化提供支持.

4　海盐气溶胶源函数的研究

4.1　基于白浪覆盖法的源函数研究

白浪覆盖法是最早用于估算海盐气溶胶源函数(SSSF)的方法,Monahan 等[19]1986 年首次提出该方法,并基于实验室模拟波浪破碎生成海盐气溶胶(SSA),提出了首个 SSSF,该方法随后广泛应用于相关研究.Gong[90]发现 Monahan 提出的 SSSF 存在粒径范围限制,结合 O'Dowd 等[91]的真实数据对其进行了修改.Clarke 等[92]利用现场数据,结合白浪覆盖法得到了一个新的 SSSF.Demoisson[45]根据地中海 MIRAMER 实验期间的数据对 Monahan 模型中的白浪覆盖分数(W)进行调整,将其与白浪覆盖率公式相结合,以更好地匹配现场数据.Laussac[73]通过结合更多的数据,将波龄纳入 W 中,改进了 Demoisson 的 SSSF 参数化模型.

传统白浪法主要基于风速对源函数进行参数化研究,但环境因子也会影响 SSA 的生成.Mårtensson 等[52]揭示了温度和盐度对 SSA 产生的影响,并将温度作参数纳入 SSSF.Sofiev 等[42]改进了 Mårtensson 模型.Rémy 等[66]的研究基于卫星遥感数据结合温度和风速修正白浪分数 W 以此对 SSSF 进行修改.Zhao 等[93]指出波龄、波高、波浪周期等波浪状态参数也会对白浪覆盖率产生影响,将 R_B 纳入了 SSSF 当中;Shi 等[94]通过将 R_B 纳入 W 当中得到了一个更符合实际数据的 SSSF. Ovadnevaite 等[57]引入 Re_{H_w} 作为一个新的参数表示波浪状态.Xu[75]提出了基于波浪陡度的通量模型.Liu 等[77]在风速为 22m/s 下的实验表明,波浪陡度对海盐气溶胶的产生有显著影响,因此将其纳入 SSSF 当中.而在 Fuentes 等[95]的研究中,为了量化有机物对气溶胶生成的影响,基于白浪覆盖法,提出了一个结合有机物的 SSSF,能够较为准确地描述有机物对 SSA 生成的影响.将环境因子引入 SSSF,有助于更全面和准确的描述 SSA 的生成.

Callaghan 等[96]通过引入新的白浪时间尺度 τ,替代了 Monahan 和 Gong 等现有模型中的旧时间尺度,从而更准确地预测了在不同风速和波浪条件下的 SSA 产生通量;Albert 等[97]基于遥感数据建立了改进的 W 参数化模型,替代 Monahan 模型中的 W,在全球 SSA 排放模拟中表现出更强的区域适应性与精度,表明 SSSF 的精度在很大程度上依赖于 W 的准确估算.并且在一部分研究中如,Rémy,Demoisson 以及 Laussac 的研究中也通过对 W 的优化改进 SSSF.Zhou 等[98]的研究利用遥感与再分析数据系统地将深度学习方法引入 W 参数化中,显著提升了建模精度与变量表达能力.Qi 等[99]采用遥感数据融合迁移学习策略,有效缓解了观测数据区域不均衡带来的建模困难,提升了 W 参数化方法在高纬度与数据稀缺区域的泛化能力.随着模型结构和遥感技术的不断发展,深度学习有望在未来更广泛地应用于 SSSF 各个环节的改进中.

现将本论文收集到的基于白浪覆盖法的源函数公式总结于表 4 中.

4.2　基于稳态干沉降法的源函数研究

Smith 等[100]基于干沉降公式,结合观测数据发现各种风速下的粒子通量呈现对数正态分布,还考虑了在高风速情况下由撕裂波峰产生的海盐气溶胶,提出了一个更加接近实际的的海盐气溶胶源函数(SSSF).Smith 等[101]基于北大西洋的数据拟合得到了另外的 SSSF.Hoppel[102]结合观测数据,对 SSA 的干沉降速度进行了细致的估算.Grythe 等[20]在基于大量数据的基础上对 Smith 和 Harrison 提出的 SSSF 进行了修改,增加了对较小粒径颗粒的描述,同

时引入温度校正函数.Chu 等[103]基于中国南海的的现场数据,得到了一个有关中国南海的 SSSF.现将本论文收集到的基于稳态干沉积法的源函数公式总结于表 5 中.

表 4 白浪覆盖法公式

Table 4 Whitecap coverage method formulas

来源	粒径范围(μm)	海盐气溶胶源函数(SSSF)公式	适用性与主要特征
[19]	$0.3< D_p <10$	$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{dlog}D_\mathrm{p}}=1.373\cdot U_{10}^{3.41}D_\mathrm{p}^{3}(1+0.057D_\mathrm{p}^{1.05})\cdot 10^{1.19\mathrm{e}^{-\frac{0.39-\log D_p}{0.65}^2}}$	高估粒径小于 0.2μm 粒子
[90]	$0.07< D_p <20$	$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}D_\mathrm{p}}=1.373U_{10}^{3.41}D_p^{-4.7(1+\theta Dp)^{-0.17}D_p-0.44}\cdot 10^{1.607\mathrm{e}^{-B^2}}$	修改 Monahan 模型扩展粒径适用范围
[92]	$0.03< D_p <20$	$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{dlog}D_\mathrm{p}}=3.84\cdot 10^{-6}U_{10}^{3.41}\sum_{i=1}^{3}\beta_{i,0}+\beta_{i,1}D_\mathrm{p}^{1}+\beta_{i,2}D_\mathrm{p}^{2}+\beta_{i,3}D_\mathrm{p}^{3}+\beta_{i,4}D_\mathrm{p}^{4}+\beta_{i,5}D_\mathrm{p}^{5}$	在粒径小于 0.1μm 具有较高精度
[45]	$0.5< D_p <10$	$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{dlog}D_\mathrm{p}}=1.373\cdot U_{10}^{3.41}D_\mathrm{p}^{-3}(1+0.057D_\mathrm{p}^{1.05})\cdot 10^{\sum_{i=1}^{3}A_i\mathrm{e}^{B_i^2}}$	适用于地中海区域
[73]	$0.5< D_p <20$	$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}D_\mathrm{p}}=\begin{cases}8\cdot 10^{6}D_\mathrm{p}^{-3}(C_\mathrm{p}/U_{10})^{2.5}(1+0.057D_\mathrm{p}^{1.05})10^{\beta} & C_p/U_{10}\leqslant 0.35\\ 2.4\cdot 10^{5}D_\mathrm{p}^{-3}(C_\mathrm{p}/U_{10})^{-0.41}(1+0.057D_\mathrm{p}^{1.05})10^{\beta} & C_p/U_{10}>0.35\end{cases}$	对 Demoisson 模型进行调整,引入波浪状态波龄
[52]	$0.02< D_p <2.8$	$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{dlog}D_\mathrm{p}}=3.84\cdot 10^{-6}U_{10}^{3.41}\cdot(A_K T_W+B_K)$	引入海洋表面温度,但是对数值非常敏感
[42]	$0.01< D_p <10$	$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}D_\mathrm{p}}=3.84\cdot U_{10}^{3.41}\cdot T_W\cdot S_W\cdot\frac{\mathrm{e}^{\left(\frac{-0.09}{D_\mathrm{p}+3\cdot 10^{-2}}\right)}}{2+\mathrm{e}^{\left(\frac{-5}{D_\mathrm{p}}\right)}}\cdot\frac{1+0.05D_\mathrm{p}^{1.05}}{D_\mathrm{p}^{3}}\cdot 10^{1.05\exp\left(-\left(\frac{0.27+\log(D_\mathrm{p})}{1.1}\right)^2\right)}$	修改 Mårtensson 模型,引入盐度
[93]	$30< D_p <500$	$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}D_\mathrm{p}}=\begin{cases}7.84\times 10^{-3}R_B^{1.5}D_\mathrm{p}^{-1} & 30<D_\mathrm{p}\leqslant 75\\ 4.41\times 10^{1}R_B^{1.5}D_\mathrm{p}^{-3} & 75<D_\mathrm{p}\leqslant 200\\ 1.41\times 10^{13}R_B^{1.5}D_\mathrm{p}^{-8} & 200<D_\mathrm{p}\leqslant 500\end{cases}$	引入波浪状态,风海雷诺数(R_B)
[94]	$2< D_p <500$	$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}D_\mathrm{p}}=\begin{cases}1.528\cdot 10^{2}\cdot R_B^{0.96}D_\mathrm{p}^{-3} & 2\leqslant D_\mathrm{p}<20\\ 3.819\cdot 10^{-1}R_B^{0.96}D_\mathrm{p}^{-1} & 20\leqslant D_\mathrm{p}<75\\ 9.045\cdot 10^{2}R_B^{0.96}D_\mathrm{p}^{-2.8} & 75\leqslant D_\mathrm{p}<200\\ 8.3616\cdot 10^{14}\cdot R_B^{0.96}D_\mathrm{p}^{-8} & 200\leqslant D_\mathrm{p}<500\end{cases}$	引入波浪状态,风海雷诺数(R_B)
[57]	$0.015< D_p <6$	$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{dlog}D_\mathrm{p}}=\sum_{i=1}^{5}\frac{F_i(Re_{\mathrm{HW}})}{\sqrt{2\pi}\ln\sigma_i}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln\left(\frac{D}{CMD}\right)}{\ln\sigma_i}\right)^2}$	引入波浪状态雷诺数(Re_{HW})
[95]	$0.003< D_p <0.45$	$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{dlog}D_\mathrm{p}}=3.84\cdot 10^{-6}U_{10}^{3.41}\sum_{i=1}^{i=4}\frac{N_{T,i}}{\sqrt{2\pi}\log\sigma_i}\mathrm{e}^{1-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(D_{p0}/D_{p0,g,i})}{\log\sigma_i}\right)^2}\frac{Q}{A_b}$	引入有机物质
[66]	$0.07< D_p <20$	$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}D_\mathrm{p}}=W\cdot 3.5755\cdot 10^{5}D_\mathrm{p}^{-A}\cdot(1+0.057D_\mathrm{p}^{3.45})\cdot 10^{1.607\mathrm{e}^{(-B^2)}}$	引入温度

4.3 基于梯度法的源函数研究

Petelski 等[104]基于 2000~2003 年间在北极大西洋水域的航行数据,首次在开放海域上使用梯度法估算海盐气溶胶(SSA)产生通量,发现以往的模型普遍低估了粒径在 1~8μm 的通量,梯度法提供了更精确的估算.Andress 等[105]发现 Petelski 等的研究中并没有统一粒径以及遗漏了 von Kármán 常数,对他们的模型进行了修改.Petelski[106]基于 2008~2012 年,RV Oceania 号研究船在波罗的海测量的数据,提出了一个有关波罗的海的 SSSF. Markuszewski[107]依托 RV Oceania 号研究船,在 2009~2017 年间开展了多次航行,对波罗的海和北大西洋两个区域的SSA浓度梯度进行了测量,并首次对比了两种不同海洋环境下 SSA 生成通量的差异.基于长期实测数据,建立了分别考虑风速、温度、波浪状态、叶绿素-a 等环境因素的 SSA 总通量的参数化模型.现将本论文收集到的基于梯度法的源函数公式总结于表 6 中.

表 5 稳态干沉积法公式

Table 5 Steady-state dry deposition method formulas

稳态干沉降法	粒径范围(μm)	海盐气溶胶源函数(SSSF)公式
[100]	$0.3<D_\mathrm{p}<25$	$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}D_\mathrm{p}}=10^{0.0676U_{10}+2.43}\mathrm{e}^{\left(-3.1(\ln[\frac{D_\mathrm{p}}{2.1}])^2\right)}+10^{0.959\sqrt{U_{10}}-1.476}\mathrm{e}^{\left(-3.3(\ln[\frac{D_\mathrm{p}}{9.2}])^2\right)}$

续表 5

稳态干沉降法	粒径范围 (μm)	海盐气溶胶源函数(SSSF)公式
[101]	$1<D_p<300$	$\frac{dF}{dD_p}=0.2U_{10}^{3.5}e^{(-1.5(\ln[\frac{D_p}{3}])^2)}+6.8U_{10}^{3}e^{(-1(\ln[\frac{D_p}{30}])^2)}$
[20]	$0.01<D_p<10$	$\frac{dF}{dD_p}=T_W[235\cdot U_{10}^{3.5}e^{(-0.55[\ln\frac{D_p}{0.1}]^2)}+0.2\cdot U_{10}^{3.5}e^{(-1.5[\ln\frac{D_p}{3}]^2)}+6.8\cdot U_{10}^{3}e^{(-1[\ln\frac{D_p}{30}]^2)}$
[103]	$0.06<D_p<5$	$\frac{dF}{d\log D_p}=\frac{10^{-1.039U_{10}^{-0.226}+4.477}}{\sqrt{2\pi}\log 1.39}\cdot e^{(-\frac{(\log D_p-\log 0.09)^2}{2(\log 1.39)^2})}$

表 6　梯度法公式

Table 6　Gradient method formulas

来源	粒径范围 (μm)	海盐气溶胶源函数(SSSF)公式
[104]	$0.25<D_p<7$	$\frac{dF}{dD_p}=e^{(-0.05U_{10}+0.64)}D_p+7.17+0.52U_{10})$
[105]	$0.25<D_p<7$	$\frac{dF}{dD_p}=0.4\cdot e^{(0.52U_{10}+0.64)}D_p$
[106]	$0.5<D_p<8$	$\frac{dF}{dD_p}=(1.83\cdot10^4\cdot U_{10}^2-1.35\cdot10^4)e^{(-1.24D_p)}$

4.4　基于涡度协方差法的源函数研究

Nilsson 等[108]早期基于北极破冰船观测数据,首次将涡度协方差法应用于海盐气溶胶(SSA)产生通量的直接测量.Geever 等[109]在北大西洋 Mace Head 站点通过涡度协方差法直接测量了 SSA 总通量.Norris 等[110]同样使用涡度协方差法直接测量了北大西洋上空的海 SSA 通量,并构建了一个 SSSF. Nilsson 等[111]的研究使用涡度协方差法直接测量了波罗的海 SSA 排放通量,验证了现有模型在低盐度条件下的适应性.基于实测与实验模拟数据的对比,该研究还对 Mårtensson 和 Salter 的模型进行了修正,使其能够适用于低盐度环境.而在 Markuszewski 等[112]的研究中,通过涡度协方差法和梯度法同步测量了波罗的海南部海域的 SSA 产生通量,在高风速条件下,涡度协方差法更可靠.此外,还提出了一种梯度法校准方法,使其测量结果更接近涡度协方差方法的结果.Zinke[113]在波罗的海对比了实验室方法与涡度协方差法测得的 SSA 生成通量,发现实验室空气夹带法所得通量与 EC 测量结果相当,同时提出一种涵盖风速和波浪状态的 SSSF 模型.现将本论文收集到的基于涡度协方差法的源函数公式总结于表 7 中.

表 7　涡度协方差法公式

Table 7　Eddy covariance method formulas

涡度协方差法	粒径范围 (μm)	海盐气溶胶源函数(SSSF)公式
[108]	$0.05<D_p<10$	$F=10^{0.2U_{10}-1.71}$
[109]	$0.01<D_p<1$	$F=10^{0.099U_{10}-0.73}$
[110]	$0.176<D_p<6.61$	$\frac{dF}{dD_p}=10^{(-0.000246D_p^6+0.0042D_p^5-0.0256D_p^4+0.0419D_p^3+0.1666)U_{10}-0.01D_p^3+0.2059D_p^2-1.37D_p+4.391}$
[113]	$0.015<D_p<10$	$\frac{dF}{d\log D_p}=\sum_{i=1}^{k}\frac{EF_i(ReH_w\cdot U_{10})}{\sqrt{2\pi}\ln\sigma_i}e^{(-\frac{1}{2}(\frac{\ln(D_p/D_{mod,i})}{\ln\sigma_i})^2)}$

4.5　基于空气夹带法的源函数研究

Long 等[36]通过波浪破裂时的能量耗散估算空气夹带率,并基于此预测全球范围内的海盐气溶胶(SSA)生成通量.他们首次将空气夹带量和叶绿素纳入气溶胶源函数模型,避免了传统白浪覆盖方法中定义实验室白浪面积的争议.Salter 等[58]在实验室中测量不同水温条件下 SSA 的产生,将这些实验数据与空气夹带量相结合,提出了一个包含温度的 SSA 源函数.Zinke 等[61]在实验室条件下,基于 Salter 的模型进行了扩展,提出了一个新的包含盐度和温度影响的 SSA 产生通量的参数化方案.现将本论文收集到的基于空气夹带法的源函数公式总结于表 8 中.

表 8　空气夹带法公式

Table 8　Air entrainment method formulas

空气夹带法	粒径范围(μm)	海盐气溶胶源函数(SSSF)公式
[36]	$0.044<D_p<24$	$\frac{dF}{d\log D_p}=2\cdot10^{-8}\cdot U_{10}^{3.41}\cdot10^{P_y}$
[58]	$0.01<D_p<10$	$\frac{dF}{d\log D_p}=\sum_{i=1}^{3}\frac{(2\pm1)\cdot10^{-8}\cdot U_{10}^{3.41}\cdot(A_iT^3+B_iT^2+C_iT+D_i)}{\sqrt{2\pi}\log\sigma_i}e^{(\frac{(\log D_p-\log\bar{D}_{mod,i})^2}{(\log\sigma_i)^2})}$
[61]	$0.015<D_p<10$	$F=a-b\cdot\arctan(c(T^d))$

4.6 基于其它方法的源函数研究

目前还存在一些研究并未通过上述方法估算气溶胶源函数,而是直接通过现场以及实验数据进行拟合.例如,Jaeglé 等[53]通过结合现场观测数据以及遥感数据,以及 GEOS-Chem 全球化学输运模型模拟结果,修正了 Gong 的参数化模型,提出了一个新的 SSSF 模型.Shi 等[114]基于 Zhao 等[72]提出的波浪相关 SSSF,通过插值优化拓展其适用范围,使其能够在更广泛的气溶胶粒径区间(1~500μm)条件下有效表征海盐气溶胶的产生通量.现将本论文收集到的基于其它方法的源函数公式总结于表 9 中.

表 9 其它方法公式

Table 9 Other methods formulas

其他方法	粒径范围(μm)	海盐气溶胶源函数(SSSF)公式
[53]	$0.01<D_p<10$	$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}D_p}=(0.3+0.1T-0.0076T^2+0.00021T^3)1.737U_{10}^{3.14}D_p^{-4}(1+0.057D_p^{3.45})10^{1.607\mathrm{e}^{-\frac{0.433-\log D_p^2}{0.433}}}$
[114]	$1<D_p<500$	$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}D_p}=\begin{cases}1.88\times10^2R_B^{1.09}D_p^{-2} & 1\leqslant D_p<25\\ \frac{30-D_p}{5}\cdot\left(1.88\times10^2R_B^{1.09}D_p^{-2}\right)+\left(7.84\times10^{-3}R_B^{1.5}D_p^{-1}\right) & 25\leqslant D_p<30\\ 7.84\times10^{-3}R_B^{1.5}D_p^{-1} & 30\leqslant D_p<75\\ 4.41\times10^{1}R_B^{1.5}D_p^{-3} & 75\leqslant D_p<200\\ 1.41\times10^{13}R_B^{1.5}D_p^{-8} & 200\leqslant D_p<500\end{cases}$

5 结语

本文回顾并归纳了现有的主要海盐气溶胶源函数(SSSF)测量方法,系统分析了多种环境因子对海盐气溶胶(SSA)生成通量的影响.现有研究表明,由于估算方法和实验条件的差异,源函数模型在粒径分布和通量量级上存在显著不一致,而这些估算方法通常建立在特定假设的基础上.此外,当前 SSSF 参数化模型大多以风速为核心变量,并通过经验性修正来考虑温度、盐度等因素的影响,这使得它们难以全面反映环境因子的复合作用,限制了模型在复杂海洋环境中的适用性与准确性.

鉴于此,探索新的建模方法以提升海盐气溶胶源函数模型的准确性,成为未来研究的重要方向.随着机器学习和深度学习技术的不断发展,其在大气气溶胶建模中的应用日益广泛.已有研究表明,这类方法在拟合复杂、多模态的气溶胶粒径分布方面表现出较强的非线性建模能力和良好的预测性能,此外,遥感与再分析数据的不断丰富,也为构建 SSSF 模型提供了坚实的数据基础,将深度学习引入 SSSF 的构建,有望突破传统模型对环境因子的局限,提升模型在全球多样化海洋条件下的适应性与泛化能力.这对于提升我国沿海地区气候模拟精度、空气质量预报水平以及海洋环境治理能力具有重要意义.

参考文献:

[1] Andreae M O, Rosenfeld D. Aerosol-cloud-precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols [J]. Earth-Science Reviews, 2008,89(1/2):13-41.

[2] Ma X, von Salzen K, Li J. Modelling sea salt aerosol and its direct and indirect effects on climate [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008,8(5):1311-1327.

[3] Lewis E R, Schwartz S E. Sea salt aerosol production: mechanisms, methods, measurements, and models [M]. American geophysical union, 2004.

[4] De Leeuw G, Andreas E L, Anguelova M D, et al. Production flux of sea spray aerosol [J]. Reviews of Geophysics, 2011,49(2):1-39.

[5] Lundgren K, Vogel B, Vogel H, et al. Direct radiative effects of sea salt for the Mediterranean region under conditions of low to moderate wind speeds [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(4):1906-1923.

[6] 何珍珍,沈志来,杨蕴玉.屯溪地区巨盐核浓度分布特点 [J]. 大气科学, 1984,8(2):211-218.
He Z Z, Shen Z L, Yang Y Y, et al. Measurements of giant salt nuclei at Tunxi [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1984,8(2):211-218.

[7] Lewis E R, Schwartz S E. Sea salt aerosol production: mechanisms, methods, measurements and models: a critical review [J]. 2004.

[8] Solomos S, Kallos G, Kushta J, et al. An integrated modeling study on the effects of mineral dust and sea salt particles on clouds and precipitation [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011,11(2): 873-892.

[9] 吴 兑,吴 晟,李 菲,等.粗粒子气溶胶远距离输送造成华南严重

空气污染的分析 [J]. 中国环境科学, 2011,31(4):540−545.
Wu D, Wu C, Li F, et al. Air pollution episode in southern China due to the long range transport of coarse particle aerosol [J]. China Environmental Science, 2011,31(4):540−545

[10] 文　彬,孔少飞,银　燕,等.秋季南通近海大气气溶胶水溶性离子粒径分布特征 [J]. 中国环境科学, 2014,34(1):49−57.
Wen B, Kong S F, Yin Y, et al. Size distribution of water−soluble ions in aerosol from an offshore site of Nantong in autumn [J]. China Environmental Science, 2014,34(1):49−57.

[11] 姚小红,郝吉明,王　玮,等.厦门海岸气溶胶中氯亏损研究 [J]. 中国环境科学, 1998,18(1):34−38.
Yao X H, Hao J M, Wang W, et al. Chloride depletion in coastal aerosol at Xiamen [J]. China Environmental Science, 1998,18(1):34−38.

[12] 吴　兑,陈位超,甘春玲,等.台山铜鼓湾低层大气盐类气溶胶分布特征 [J]. 气象, 1993,19(8):8−12.
Wu D, Chen W C, Gan C L, et al. The distribution of lower atmosperic salt aerosols for the Tong−gu bay in Taishan, Guangdong province [J]. Meteorological Monthly, 1993,19(8):8−12.

[13] 吴　兑,关越坚,毛伟康,等.广州盛夏期海盐核(Cl⁻)巨粒子的分布特征.大气科学, 1991,15(5):124−128.
Wu D, Guang Y J, Mao W K, et al. Distribution of giant particles of Sea−Salt Nuclei in Guangzhou during summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1991,15(5):124−128.

[14] 沈　傲,田春艳,刘一鸣,等.海陆风环流中海盐气溶胶对大气影响的模拟 [J]. 中国环境科学, 2019,39(4):1427−1435.
Shen A, Tian C Y, Liu Y M, et al. The inluence of sea salt aerosols on atmospheric environment under sea−and−breeze circulation: A numerical simulation [J]. China Environmental Science, 2019,39(4):1427−1435.

[15] Geng D. Is distant pollution contaminating local air? Analyzing the origins of atmospheric aerosols [J]. The Journal of Purdue Undergraduate Research, 2012,2(1):1−4.

[16] 沈志来,黄美元,吴玉霞.西太平洋热带海域海盐粒子的观测和结果 [J]. 大气科学, 1989,13(1):87−91.
Shen Z L, Huang M Y, Wu Y X. Measurements of sea salt particles in the Tropical West Pacific area [J]. Chinese Journal of atmospheric sciences, 1989,13(1):87−91.

[17] Andreas E L. Sea spray and the turbulent air−sea heat fluxes [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1992,97(C7):11429−11441.

[18] Blanco−Rodríguez F J, Gordillo J M. On the sea spray aerosol originated from bubble bursting jets [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2020,886(R2):1−13.

[19] Monahan E C, Spiel D E, Davidson K L. A model of marine aerosol generation via whitecaps and wave disruption [M]//Oceanic whitecaps: And their role in air−sea exchange processes. Dordrecht: Springer Netherlands, 1986:167−174.

[20] Grythe H, Ström J, Krejci R, et al. A review of sea−spray aerosol source functions using a large global set of sea salt aerosol concentration measurements [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014,14(3):1277−1297.

[21] Woodcock A H. Salt nuclei in marine air as a function of altitude and wind force [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1953,10(5):362−371.

[22] 沈志来,何珍珍,沈　洪.我国近海和陆地巨型盐核的分布特点和变化规律 [J]. 气象学报, 1981,39(2):205−216.
Shen Z L, He Z Z, Shen H. The Distribution and variation of the maritime and continental giant salt nuclei in China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1981,39(2):205−216.

[23] Xiao Y, Wang Y, Yuan Q, et al. Generating a long−term (2003~2020) hourly 0.25° global $PM_{2.5}$ dataset via spatiotemporal downscaling of CAMS with deep learning (DeepCAMS) [J]. Science of The Total Environment, 2022,848:157747.

[24] 陈兴峰,郑逢杰,郭　丁,等.气溶胶定量遥感的机器学习方法综述 [J]. 遥感学报, 2021,25(11):2220−2233.
Chen X F, Zheng F J, Guo D et al. Review of machine learning methods for aerosol quantitative remote sensing [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021,25(11):2220−2233.

[25] Andreas E L. A review of the sea spray generation function for the open ocean [J]. Advances in Fluid Mechanics, 2002,33:1−46.

[26] Long M S, Keene W C, Kieber D J, et al. A sea−state based source function for size−and composition−resolved marine aerosol production [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011,11(3):1203−1216.

[27] Tyree C A, Hellion V M, Alexandrova O A, et al. Foam droplets generated from natural and artificial seawaters [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007,112(D12).

[28] Anguelova M D, Bettenhausen M H. Whitecap fraction from satellite measurements: Algorithm description [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019,124(3):1827−1857.

[29] Zhou S, Xu F, Shi R. Whitecap fraction parameterization and understanding with deep neural network [J]. Remote Sensing, 2022,15(1):241.

[30] 林官明,蔡旭晖,胡　敏,等.大气气溶胶干沉降研究进展 [J]. 中国环境科学, 2018,38(9):3211−3220.
Lin G M, Cai X H, Hu M, et al. An overview of atmospheric aerosol dry deposition [J]. China Environmental Science, 2018,38(9):3211−3220.

[31] Petelski T. Marine aerosol fluxes over open sea calculated from vertical concentration gradients [J]. Journal of aerosol science, 2003,34(3):359−371.

[32] McGillis W R, Edson J B, Hare J E, et al. Direct covariance air−sea CO_2 fluxes [J]. Journal of geophysical research: Oceans, 2001,106(C8):16729−16745.

[33] Kondo F, Fujita T, Aiki H. Direct measurements of sea spray particle fluxes using a high temporal resolution optical particle counter over the coastal ocean [J]. Coastal Engineering Journal, 2024,66(3):467−478.

[34] Chen S P, You C H, Hu Z M, et al. Eddy covariance technique and its applications in flux observations of terrestrial ecosystems [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020,44(4):291−304.

[35] Miller S D, Hristov T S, Edson J B, et al. Platform motion effects on measurements of turbulence and air−sea exchange over the open ocean [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008,25(9):1683−1694.

[36] Long M S, Keene W C, Kieber D J, et al. A sea−state based source function for size−and composition−resolved marine aerosol production [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011,11(3):1203−1216.

[37] Salter M E, Nilsson E D, Butcher A, et al. On the seawater temperature dependence of the sea spray aerosol generated by a continuous plunging jet [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(14):9052−9072.

[38] Deike L, Reichl B G, Paulot F. A mechanistic sea spray generation function based on the sea state and the physics of bubble bursting [J]. AGU Advances, 2022,3(6):e2022AV000750.

[39] Rudiger J J, Book K, deGrassie J S, et al. A machine learning approach for predicting atmospheric aerosol size distributions [C]//Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans VI. SPIE, 2017,10408:191−201.

[40] Wu Y, Zaidan M A, Cai R, et al. Estimating the atmospheric aerosol number size distribution using deep learning [J]. Environmental Science: Atmospheres, 2025,5(3):367−377.

[41] Qiu Y, Feng J, Zhang Z, et al. Regional aerosol forecasts based on deep learning and numerical weather prediction [J]. npj Climate and Atmospheric Science, 2023,6(1):71.

[42] Sofiev M, Soares J, Prank M, et al. A regional−to−global model of emission and transport of sea salt particles in the atmosphere [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011,116(D21):715−739.

[43] Prandtl L. Meteorogische an wendung der stromungslehre [J]. Beitr. Phys. Atomosph, 1932,19:188−202.

[44] Monin A S, Obukhov A M. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere [J]. Contrib Geophys Inst Acad Sci USSR, 1954,151(163):e187.

[45] Demoisson A, Tedeschi G, Piazzola J. A model for the atmospheric transport of sea-salt particles in coastal areas [J]. Atmospheric research, 2013,132:144−153.

[46] Jiang X, Rotily L, Villermaux E, et al. Submicron drops from flapping bursting bubbles [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2022,119(1):e2112924119.

[47] 何珍珍,黄美元,陈炎涓,等.我国东部(30°N)从海岛到陆地巨盐核观测 [J]. 大气科学, 1985,9(3):251−259.
He Z Z, Huang M Y, Chen Y J, et al. Measurements of the giant salt nuclei from island to inland at 30°N in east China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1985,9(3):251−259.

[48] Callaghan A, de Leeuw G, Cohen L, et al. Relationship of oceanic whitecap coverage to wind speed and wind history [J]. Geophysical Research Letters, 2008,35(23):L23609.

[49] Ovadnevaite J, Ceburnis D, Canagaratna M, et al. On the effect of wind speed on submicron sea salt mass concentrations and source fluxes [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012,117 (D16):201−211.

[50] Bowyer P A, Woolf D K, Monahan E C. Temperature dependence of the charge and aerosol production associated with a breaking wave in a whitecap simulation tank [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1990,95(C4):5313−5319.

[51] Sellegri K, O'Dowd C D, Yoon Y J, et al. Surfactants and submicron sea spray generation [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006,111(D22):D22215.

[52] Mårtensson E M, Nilsson E D, de Leeuw G, et al. Laboratory simulations and parameterization of the primary marine aerosol production [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108(D9):4297−4309.

[53] Jaeglé L, Quinn P K, Bates T S, et al. Global distribution of sea salt aerosols: new constraints from in situ and remote sensing observations [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011,11(7):3137−3157.

[54] Schwier A N, Sellegri K, Mas S, et al. Primary marine aerosol physical flux and chemical composition during a nutrient enrichment experiment in mesocosms in the Mediterranean Sea [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017,17(23):14645−14660.

[55] Forestieri S D, Moore K A, Martinez Borrero R, et al. Temperature and composition dependence of sea spray aerosol production [J]. Geophysical Research Letters, 2018,45(14):7218−7225.

[56] Hultin K A H, Krejci R, Pinhassi J, et al. Aerosol and bacterial emissions from Baltic Seawater [J]. Atmospheric research, 2011,99(1): 1−14.

[57] Ovadnevaite J, Manders A, De Leeuw G, et al. A sea spray aerosol flux parameterization encapsulating wave state [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014,14(4):1837−1852.

[58] Salter M E, Zieger P, Acosta Navarro J C, et al. An empirically derived inorganic sea spray source function incorporating sea surface temperature [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015,15(19): 11047−11066.

[59] Zábori J, Krejci R, Ekman A M L, et al. Wintertime Arctic Ocean sea water properties and primary marine aerosol concentrations [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012,12(21):10405−10421.

[60] Zábori J, Matisāns M, Krejci R, et al. Artificial primary marine aerosol production: a laboratory study with varying water temperature, salinity, and succinic acid concentration [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012,12(22):10709−10724.

[61] Zinke J, Nilsson E D, Zieger P, et al. The effect of seawater salinity and seawater temperature on sea salt aerosol production [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2022,127(16):e2021JD036005.

[62] Sellegri K, Barthelmeß T, Trueblood J, et al. Quantified effect of seawater biogeochemistry on the temperature dependence of sea spray aerosol fluxes [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2023,2023:1−25.

[63] Christiansen S, Salter M E, Gorokhova E, et al. Sea spray aerosol formation: Laboratory results on the role of air entrainment, water temperature, and phytoplankton biomass [J]. Environmental Science & Technology, 2019,53(22):13107−13116.

[64] Liu S, Liu C C, Froyd K D, et al. Sea spray aerosol concentration modulated by sea surface temperature [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2021,118(9):e2020583118.

[65] Nielsen L S, Bilde M. Exploring controlling factors for sea spray aerosol production: temperature, inorganic ions and organic surfactants [J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2020,72(1):1−10.

[66] Rémy S, Anguelova M D. Improving the Representation of Whitecap Fraction and Sea Salt Aerosol Emissions in the ECMWF IFS-AER [J]. Remote Sensing, 2021,13(23):4856−4877.

[67] May N W, Axson J L, Watson A, et al. Lake spray aerosol generation: a method for producing representative particles from freshwater wave breaking [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2016,9(9):4311−4325.

[68] Russell L M, Singh E G. Submicron salt particle production in bubble bursting [J]. Aerosol Science and Technology, 2006,40(9):664−671.

[69] Harb C, Foroutan H. A systematic analysis of the salinity effect on air bubbles evolution: Laboratory experiments in a breaking wave analog [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019,124(11): 7355−7374.

[70] 吴　兑,毛伟康,甘春玲,等.西沙永兴岛西南季风期大气中 Cl^-和 SO_4^{2-}核的分布特征 [J]. 热带气象学报, 1990,(4):357−364.
Wu D, Mao W K, Gan C L, et al. The distribution feature of giant sea−salt nucleus in atmosphere over Yongxing(Xisha islands) during the south−west summer monsoon [J]. Journal of Tropical Meteorology, 1990,(4):357−364.

[71] 吴　兑,游积平,关越坚.西沙群岛大气中海盐粒子的分布特征 [J]. 热带气象学报, 1996,(2):122−129.
Wu D, You J P, Guan Y J. the distribution feature of giant sea−salt nucleus in atmosphere over Yongxing (Xisha islands) during the northeast winter monsoon [J]. Journal of Tropical Meteorology, 1996, (2):122−129.

[72] Zhao D, Toba Y. Dependence of whitecap coverage on wind and wind−wave properties [J]. Journal of oceanography, 2001,57(5):603−616.

[73] Laussac S, Piazzola J, Tedeschi G, et al. Development of a fetch dependent sea−spray source function using aerosol concentration measurements in the North−Western Mediterranean [J]. Atmospheric Environment, 2018,193:177−189.

[74] Ma H, Babanin A V, Qiao F. Field observations of sea spray under tropical cyclone Olwyn [J]. Ocean Dynamics, 2020,70(11):1439−1448.

[75] Xu X, Voermans J J, Ma H, et al. A wind−wave−dependent sea spray volume flux model based on field experiments [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021,9(11):1168−1184.

[76] Xu X, Voermans J J, Guan C, et al. Sea spray induced air−sea heat and salt fluxes based on the wave−steepness−dependent sea spray model [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2023,42(5):35−41.

[77] Liu Z, Ma H, Chen S, et al. A laboratory study of wave steepness effects on sea spray generation [J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2024,107:101466.

[78] Zhao Z, Shi J, Wang H, et al. Parameterization scheme of the sea surface drag coefficient considering the influence of wave states and sea spray stress [J]. Frontiers in Marine Science, 2024,11:1336709.

[79] Myrhaug D, Leira B J, Radhakrishnan G, et al. Sea spray volume flux estimation using joint statistics of wind and waves [J]. Oceanologia, 2022,64(4):789−793.

[80] King S M, Butcher A C, Rosenoern T, et al. Investigating primary marine aerosol properties: CCN activity of sea salt and mixed inorganic-organic particles [J]. Environmental Science & Technology, 2012,46(19):10405−10412.

[81] Modini R L, Russell L M, Deane G B, et al. Effect of soluble surfactant on bubble persistence and bubble−produced aerosol particles [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(3):1388−1400.

[82] Liu L, Du L, Xu L, et al. Molecular size of surfactants affects their degree of enrichment in the sea spray aerosol formation [J]. Environmental Research, 2022,206:112555.

[83] Lv C, Tsona N T, Du L. Sea spray aerosol formation: Results on the role of different parameters and organic concentrations from bubble bursting experiments [J]. Chemosphere, 2020,252:126456.

[84] Fuentes E, Coe H, Green D, et al. On the impacts of phytoplankton−derived organic matter on the properties of the primary marine aerosol – Part 2: Composition, hygroscopicity and cloud condensation activity [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011,11(6):2585−2602.

[85] Yoon Y J, Ceburnis D, Cavalli F, et al. Seasonal characteristics of the physicochemical properties of North Atlantic marine atmospheric aerosols [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007,112 (D4):D04206.

[86] O'Dowd C D, Langmann B, Varghese S, et al. A combined organic−inorganic sea−spray source function [J]. Geophysical Research Letters, 2008,35(1):L01801.

[87] Saliba G, Chen C L, Lewis S, et al. Factors driving the seasonal and hourly variability of sea−spray aerosol number in the North Atlantic [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019,116(41): 20309−20314.

[88] Inness A, Ades M, Agustí−Panareda A, et al. The CAMS reanalysis of atmospheric composition [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019,19(6):3515−3556.

[89] Peuch V H, Engelen R, Rixen M, et al. The copernicus atmosphere monitoring service: From research to operations [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2022,103(12):E2650−E2668.

[90] Gong S L. A parameterization of sea−salt aerosol source function for sub−and super−micron particles [J]. Global biogeochemical cycles, 2003,17(4):1097−1103.

[91] O'Dowd C D, Smith M H, Consterdine I E, et al. Marine aerosol, sea−salt, and the marine sulphur cycle: A short review [J]. Atmospheric Environment, 1997,31(1):73−80.

[92] Clarke A D, Owens S R, Zhou J. An ultrafine sea-salt flux from breaking waves: Implications for cloud condensation nuclei in the remote marine atmosphere [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006,111(D6):D06202.

[93] Zhao D, Toba Y, Sugioka K, et al. New sea spray generation function for spume droplets [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2006,111(C2):99−109.

[94] Shi J, Zhang W, Zhang X, et al. Parameterization of the sea spray generation function with whitecap coverage [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2020,39:24−33.

[95] Fuentes E, Coe H, Green D, et al. On the impacts of phytoplankton−derived organic matter on the properties of the primary marine aerosol−Part 1: Source fluxes [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010,10(19):9295−9317.

[96] Callaghan A H. An improved whitecap timescale for sea spray aerosol production flux modeling using the discrete whitecap method [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013,118(17):9997−10010.

[97] Albert M F M A, Anguelova M D, Manders A M M, et al. Parameterization of oceanic whitecap fraction based on satellite observations [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016,16(21): 13725−13751.

[98] Zhou S, Xu F, Shi R. Whitecap fraction parameterization and understanding with deep neural network [J]. Remote Sensing, 2022, 15(1):241-255.

[99] Qi J, Yang Y, Zhang J. Global prediction of whitecap coverage using transfer learning and satellite-derived data [J]. Remote Sensing, 2025, 17(7):1152-1168.

[100] Smith M H, Park P M, Consterdine I E. Marine aerosol concentrations and estimated fluxes over the sea [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1993,119(512):809-824.

[101] Smith M H, Harrison N M. The sea spray generation function [J]. Journal of Aerosol Science, 1998,29:S189-S190.

[102] Hoppel W A, Frick G M, Fitzgerald J W. Surface source function for sea-salt aerosol and aerosol dry deposition to the ocean surface [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2002,107(D19):AAC 7-1-AAC 7-17.

[103] Chu Y, Sheng L, Liu Q, et al. Size distributions and source function of sea spray aerosol over the South China Sea [J]. Journal of Ocean University of China, 2016,15:569-576.

[104] Petelski T, Piskozub J. Vertical coarse aerosol fluxes in the atmospheric surface layer over the North Polar Waters of the Atlantic [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2006,111(C6):577-585.

[105] Andreas E L. Comment on "Vertical coarse aerosol fluxes in the atmospheric surface layer over the North Polar Waters of the Atlantic" by Tomasz Petelski and Jacek Piskozub [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2007,112(C11):C11010.

[106] Petelski T, Markuszewski P, Makuch P, et al. Studies of vertical coarse aerosol fluxes in the boundary layer over the Baltic Sea [J]. Oceanologia, 2014,56(4):697-710.

[107] Markuszewski P, Nilsson E D, Zinke J, et al. Multi-year gradient measurements of sea spray fluxes over the Baltic Sea and the North Atlantic Ocean [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2024,24(19): 11227-11253.

[108] Nilsson E D, Rannik Ü, Swietlicki E, et al. Turbulent aerosol fluxes over the Arctic Ocean: 2. Wind-driven sources from the sea [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001,106(D23): 32139-32154.

[109] Geever M, O'Dowd C D, van Ekeren S, et al. Submicron sea spray fluxes [J]. Geophysical Research Letters, 2005,32(15):L15810.

[110] Norris S J, Brooks I M, Hill M K, et al. Eddy covariance measurements of the sea spray aerosol flux over the open ocean [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012,117(D7): D07210.

[111] Nilsson E D, Hultin K A H, Mårtensson E M, et al. Baltic sea spray emissions: In situ eddy covariance fluxes vs. simulated tank sea spray [J]. Atmosphere, 2021,12(2):274-306.

[112] Markuszewski P, Petelski T, Zielinski T. Marine aerosol fluxes determined by simultaneous measurements of eddy covariance and gradient method [J]. Environmental Engineering and Management Journal, 2018,17:261-265.

[113] Zinke J, Nilsson E D, Markuszewski P, et al. Sea spray emissions from the Baltic Sea: comparison of aerosol eddy covariance fluxes and chamber-simulated sea spray emissions [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2024,24(3):1895-1918.

[114] Shi J, Zhong Z, Li X, et al. The Influence of wave state and sea spray on drag coefficient from low to high wind speeds [J]. Journal of Ocean University of China, 2016,15:41-49.

作者简介：况 晨(2001-),男,江西宜春人,北京科技大学硕士研究生,主要从事海盐气溶胶方向研究.ckuang_0509@163.com.