

北部湾不同等级雾的微物理特征分析:以钦州一次海雾过程为例

陆芊芊¹, 郑凤琴^{1*}, 李广桃¹, 韦美闹²

(1. 广西壮族自治区气候中心, 广西南宁 530022; 2. 钦州市气象局, 广西钦州 535009)

摘要: 利用2021年春季在钦州观测到的雾滴谱数据, 分析了轻雾、大雾、浓雾和强浓雾4个等级下的微物理特征, 探讨不同海雾等级下的微物理过程。结果表明: 随着雾等级的增加, 雾滴数浓度、液态含水量、平均直径的平均值和数浓度的最大值逐渐增大, 平均直径的最大值出现在浓雾等级下; 雾滴谱呈现单调递减分布, 平均谱满足Junge分布, 从轻雾到强浓雾的雾滴谱谱线逐级抬升, 轻雾的谱宽最窄, 大雾、浓雾、强浓雾的谱宽一致, 最大雾滴直径均为48.5 μm ; 在轻雾和大雾等级下, 核化和凝结增长是主要的微物理过程, 各微物理特征量之间为强的正相关关系; 浓雾和强浓雾等级下, 雾滴的核化、凝结增长和碰并增长并存, 数浓度与平均直径呈弱的负相关关系。

关键词: 海雾; 雾等级; 微物理特征; 雾滴谱; 微物理相关性

中图分类号: P732.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)03-0009-12

0 引言

海雾是由于海表面低层大气中的水汽凝结而形成的一种天气现象, 其水平能见度小于1 km^[1]。当海雾发生时, 水平能见度降低, 常常导致航船看不清航标, 很容易偏离航线, 甚至发生碰撞造成海上事故。据统计, 60%~70%的海上碰撞事故与海雾有关, 海雾造成的总经济损失与台风造成的损失相当^[1]。

海雾外场观测是了解海雾微物理过程、提高海雾数值模拟准确性的有效手段。自20世纪初以来, 国外许多学者开展了海雾观测研究。1958年, Eldridge^[2]观测了两次雾过程, 发现雾滴尺度越小, 数浓度越大; Goodman^[3]发现美国太平洋海岸平流雾的雾滴平均粒径和含水量随高度增加; Wendish等^[4]发现意大利北部波河流域的雾滴谱分布是双峰型, Barakah核电站区域的雾滴谱也具有双峰分布特征^[5]。近年来, 我国学者在华东沿海、华南沿海、福建沿海等地进行了系统的海雾观测, 取得了较大

成果。不同地区的平均谱分布不同, 舟山地区的雾滴谱符合Deirmendjian分布^[6], 茂名、厦门的平均雾滴谱符合Junge分布^[7-8]。海雾成熟阶段, 数浓度与平均直径之间存在负相关, 而在其他阶段为正相关, 这是由于不同阶段微物理过程的交替变化所致^[9]。海雾中小滴数量的增加主要是由于核化和凝结, 而滴谱的拓宽和变窄分别由碰并和重力沉降引起^[10]。总之, 海雾的微观结构和演变在不同地区、不同雾事件和海雾的不同阶段存在明显差异^[11-13]。

以往的微物理特征研究多是根据海雾的发展演变将海雾过程划分为不同阶段进行分析^[14-16], 对不同等级海雾的微物理结构特征的分析却较少, 研究对象也仅针对陆地雾^[17-19]。同时, 针对北部湾开展的海雾外场观测很少, 因此缺乏系统、连续和直接的观测资料, 尤其是微物理特征量数据, 因而对海雾微观结构特征的理解仍然不足。北部湾位于中国南海的西北部, 是中国西南、中南、西北的出海口, 更是中国面向东盟国际陆海贸易新通道的重要枢纽区域, 截至2022年底, 北部湾进出港96 933艘

收稿日期: 2024-06-12。

基金项目: 广西气象科研计划(桂气科2023QN01); 广西重点研发计划项目(桂科AB20159013); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J029)。

作者简介: 陆芊芊(1994-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事气象灾害影响研究与气候变化工作。E-mail: luqianqian_1026@outlook.com

*通信作者: 郑凤琴(1978-), 女, 正高级工程师, 硕士, 主要从事气候监测与灾害影响研究。E-mail: zhengfengq@sohu.com

次。海面浓雾对北部湾海域的各种活动影响很大,例如 2015 年底的一次严重海雾天气过程造成航道停运 70 多个小时,所有的海上作业全部停止,2022 年初的持续性浓雾造成海上航运、港口作业和海上旅游全部停止,均造成严重的经济损失。因此,本研究在钦州进行了海雾外场观测试验,利用收集到的雾滴谱资料,研究轻雾、大雾、浓雾和强浓雾 4 个等级下的微物理特征、雾滴谱分布及微物理关系,探讨不同海雾等级下的微物理过程,旨在为进一步理解海雾的生成过程、提升北部湾海雾的预报能力起到一定的启示作用。

1 数据与方法

1.1 观测概况

广西北部湾位于中国南海的西北部,被中越两国陆地与中国海南岛所环抱,是一个半封闭的海湾。北部湾雾季主要出现在每年 12 月一次年 4 月,年均海雾日数达到 20 天以上^[20-21]。本研究于 2021 年 2—4 月在广西北部湾开展了海雾的外场综合观测试验,观测场地位于北部湾海域北部的钦州三娘湾海洋观测基地(21.62°N, 108.73°E)内,观测场下垫面平坦开阔,南面为广阔的海洋。

在观测基地布设了 Droplet Measurement Technologies 公司生产的 FM-100 型雾滴谱仪,并利用观测基地的自动气象站观测系统分别进行海雾微物理特征量、水平能见度、温度、风速和风向等要素的观测。FM-100 型雾滴谱仪用于观察和量化海雾中的微观物理过程,该仪器已被广泛用于海雾外场观测^[22-26],但在钦州为首次部署。该雾滴谱仪的工作原理参见 Gultepe 等^[11, 23]和 Niu 等^[24]的介绍,仪器架设在一栋办公楼的 2 层阳台,海拔约为 12 m,距离海边 50 m 左右,面向大海,无障碍物遮挡,观测条件佳。水平能见度及常规气象要素数据源自广西气象技术装备中心,时间分辨率为 5 min。

1.2 观测方法

以水平能见度(Visibility, VIS, 简称能见度)的大小作为识别海雾生消的标准,即 VIS < 1 000 m 且持续 10 min 以上,则认为海雾发生;当 VIS > 10 000 m,则退回寻找最后一个 VIS < 1 000 m 的时刻,并将该时刻

记为此次海雾过程的结束时间^[27-28]。以上为本文判断一次海雾过程的标准。

参考中华人民共和国国家标准(GB/T 27964-2011)^[29]以及北部湾海雾的特征,根据能见度大小对海雾过程进行分级,即轻雾(1 000 m ≤ VIS < 10 000 m)、大雾(500 m ≤ VIS < 1 000 m)、浓雾(200 m ≤ VIS < 500 m)、强浓雾(VIS < 200 m)4 个等级。

在计算微物理特征量之前,首先剔除直径小于 2 μm 的数据,因为该档大部分颗粒是干气溶胶粒子,数浓度(Number Concentration, N , 单位: cm⁻³)、液态含水量(Liquid Water Content, LWC, 单位: g/m³)、平均直径(Average Diameter, \bar{D} , 单位: μm)等微物理特征量根据 Niu 等^[24]的方法进行计算。

为解决雾滴谱仪实际观测期间部分秒次有缺失的问题,将处理好的雾滴谱资料进行 1 min 切尾平均。切尾均值是一个常用的反映样本数据的特征量,即将数据的最大、最小值舍去,用剩余的值来计算样本均值。计算公式为:

$$\bar{x}_\alpha = \frac{x_{(|n\alpha|+1)} + x_{(|n\alpha|+2)} + \cdots + x_{(n-|n\alpha|)}}{n - 2|n\alpha|} \quad (1)$$

式中: \bar{x}_α 为切尾均值; n 为样本量; $0 < \alpha < 1/2$ 是切尾系数; $x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \cdots \leq x_{(n)}$ 是有序样本。

由于能见度及常规气象要素数据的时间分辨率为 5 min,为了分析其与雾微物理特征量的关系,在 1 min 切尾平均值的基础上,计算微物理特征量的 5 min 算术平均值。

除了雾滴谱数据,本项目还使用了广西气象技术装备中心提供的观测点的能见度及常规气象要素资料。数据需进行以下处理:①将数据时间从世界时修正为北京时;②进行异常数据检查修正和数据质量控制,对于某个数据乱码、日期时间记录错误、某个气象要素无记录等情况,进行手工修正、作缺省处理或将部分缺测时次资料用前后两个时次进行插值,并将能见度与雾微物理特征量一一匹配,剔除认知异常值,即高能见度下雾微物理特征量高值等,然后采用三倍标准差法剔除异常值。定义 \bar{Y} 为样本均值, σ 为样本标准差:

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3)$$

式中: Y_i 是数据样本; n 为样本量; 当 $Y_i - \bar{Y} \geq 3\sigma$ 时, 剔除 Y_i 。

2 结果与讨论

2.1 雾微物理特征

2021年3月5日02:05—21:25(北京时, 本文的

海雾过程均指该时段), 北部湾出现了一次浓雾天气, 并持续将近20 h。图1、图2分别为此次海雾过程中气象条件、能见度和微物理特征量随时间的变化, 轻雾、大雾、浓雾、强浓雾4个等级分别以灰色、黄色、橙色、红色表示。

从图1可以看出, 02:05时, VIS<1 000 m, 海面起雾; 02:05—15:35, 大雾与轻雾交替发生; 15:40—18:05, 海雾等级主要为大雾等级; 18:10—18:40, 大雾发展为浓雾; 18:45—20:40, 强浓雾持续近2 h; 之后,

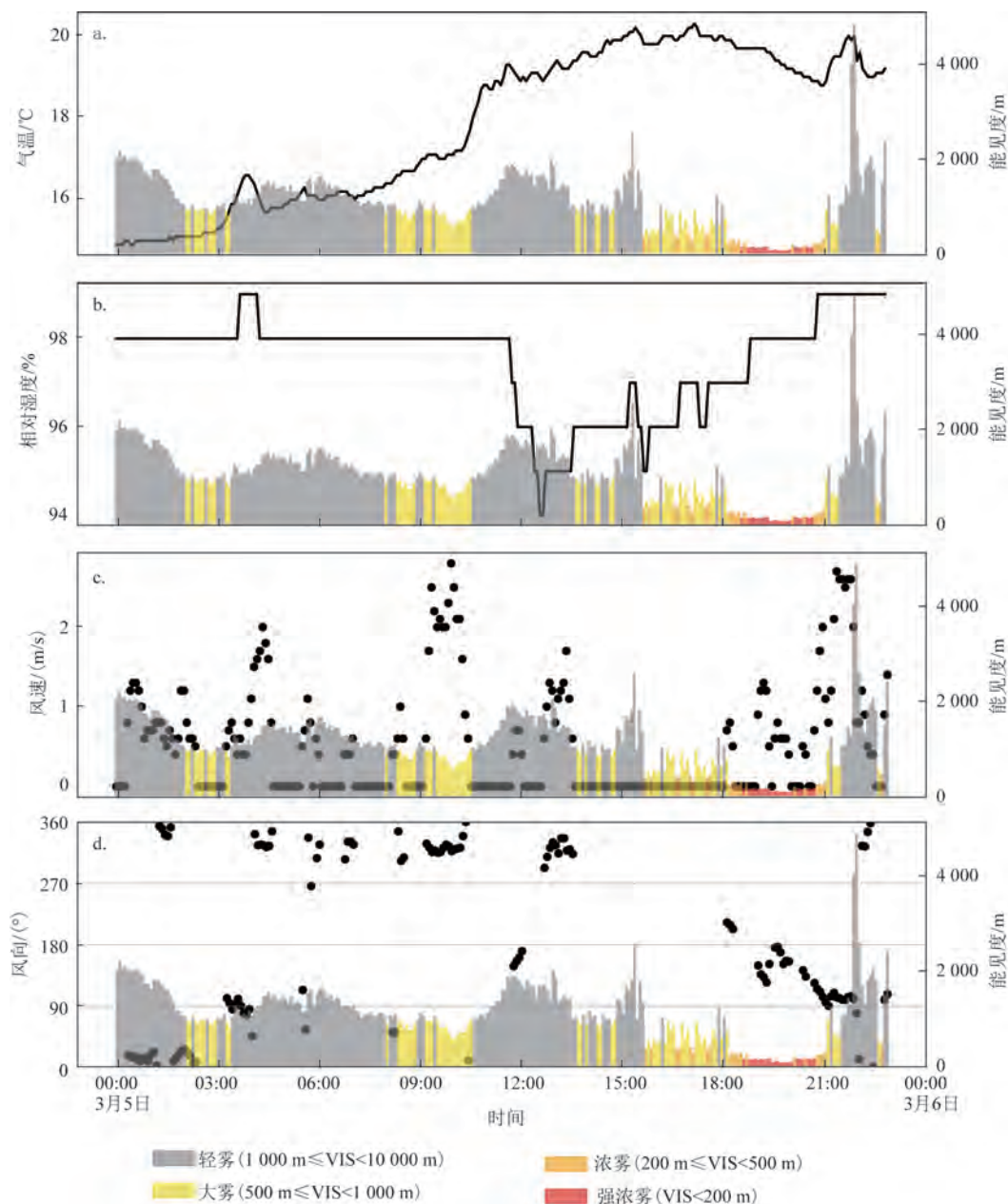


图1 能见度和气象要素随时间的演变

Fig.1 The evolution of visibility and meteorological elements

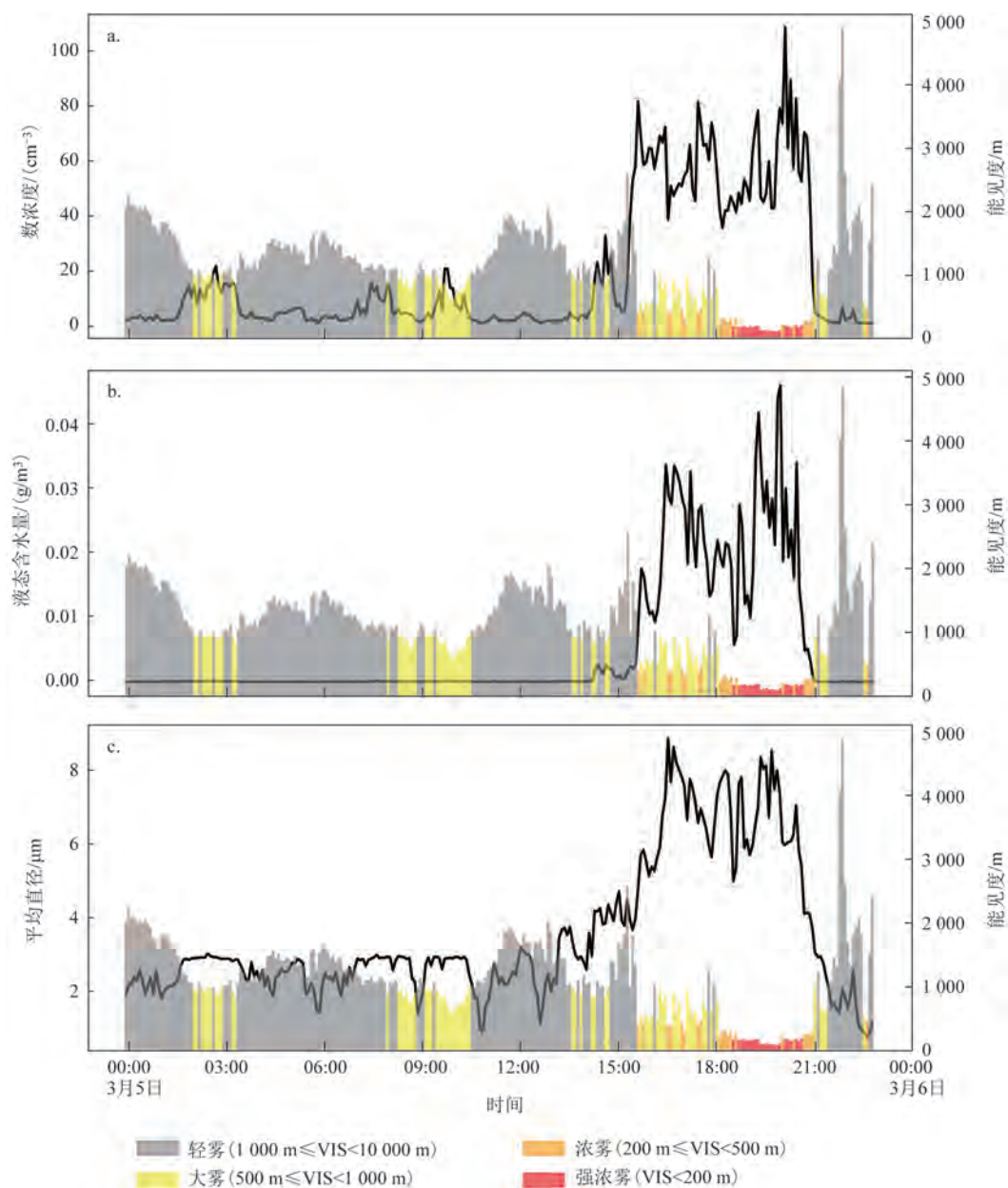


图2 能见度和微物理特征量随时间的演变

Fig.2 The evolution of visibility and microphysical quantities

转为浓雾和大雾,21:30时,VIS>1 000 m,海雾消散。

海雾发生前,能见度和风速逐渐下降,风向以北风为主,气温较低(维持在15℃左右),水汽条件好(相对湿度维持在98%);数浓度(见图2a)、液态含水量(见图2b)、平均直径(见图2c)的起伏变化小,均在较低值附近波动。

大雾等级下,能见度下降至1 000 m以下,相对湿度稳定维持在较高值(96%~98%),风速较小(小于3 m/s)或为静风,风向多为西北风,该等级下相对

湿度和风速条件较有利于海雾发展;数浓度和平均直径相对较大,并出现一个小的波动峰值,数浓度、液态含水量和平均直径的平均值分别为23.9/cm³、0.006 g/m³、4.0 μm,最大值分别为73.3/cm³、0.03 g/m³、8.6 μm。详细分析15:40—18:05的大雾等级过程,气温缓慢下降,相对湿度波动增加,风均为静风,气象条件十分有利于海雾的进一步发展和维持;微物理特征量起伏变化较大,能见度、数浓度波动变化,液态含水量和平均直径的变化一致,均为“单

峰”变化,在16:30左右达到峰值,分别为 0.03 g/m^3 和 $8.6 \mu\text{m}$ 。

浓雾等级下,气象要素的变化与大雾等级下基本一致,即气温缓慢下降,相对湿度稳定维持在较高值(97%~98%),风速 $< 1 \text{ m/s}$ 或为静风,风向为西南偏南风;浓雾中微物理特征量相较于大雾和强浓雾偏小,数浓度、液态含水量和平均直径均围绕某个值波动变化,平均值分别为 $53.3/\text{cm}^3$ 、 0.02 g/m^3 、 $6.4 \mu\text{m}$ 。

强浓雾等级下,气温迅速下降,其下降速率大于大雾和浓雾等级,相对湿度波动增加,风速在低位振荡(保持在 1 m/s 左右),风向在东南偏南—东南偏东之间变化。微物理特征量的波动最大,数浓度和液态含水量的最大值出现在这一等级,平均直径在高位波动,平均保持在 $6.8 \mu\text{m}$ 。数浓度和液态含水量表现出“双峰”变化,二者先是波动增加,于19:20左右达到第一个峰值,分别为 $77.7/\text{cm}^3$ 和 0.04 g/m^3 ,随后波动下降之后迅速增大,20:00左右达到最大值的 $108.1/\text{cm}^3$ 和 0.05 g/m^3 。

轻雾主要出现在海雾过程的间歇期,该等级下气温波动上升,相对湿度起伏变化较大且伴有下降趋势,风速不大($1\sim 2 \text{ m/s}$)或为静风,风向多为北风,多为海雾发展维持的不利条件;微物理特征量变化比较平稳,起伏很小,数浓度、液态含水量、平均直径数值都很小,平均数浓度仅为 $6.9/\text{cm}^3$,平均液态含水量为 $0.000 5 \text{ g/m}^3$,平均直径的平均值为 $2.7 \mu\text{m}$ 。

从不同等级下微物理特征量的统计结果(见表1)可以看到,随着雾等级的提升(轻雾—强浓雾),雾滴数浓度的平均值和极值逐步升高。与雾滴数浓度类似,随着雾等级的提升,液态含水量也呈现量级式增长,从轻雾—大雾,液态含水量的平均值各增加一个数量级,但浓雾与强浓雾等级下液态含

水量的平均值(均为 0.02 g/m^3)与最大值(分别为 0.03 g/m^3 和 0.05 g/m^3)差异不大。随着雾等级的提升,平均直径的平均值随之增大,但浓雾和强浓雾下的平均值相差不大,从大雾—强浓雾平均直径的最大值基本一致,分别为 $8.6 \mu\text{m}$ 、 $8.8 \mu\text{m}$ 、 $8.5 \mu\text{m}$,最大值出现在浓雾中。

2.2 雾滴谱分布

此次海雾过程的雾滴谱呈单调递减(见图3a),当雾滴直径 $< 7 \mu\text{m}$ 时,雾滴数密度随着雾滴直径的增大迅速减小,雾滴直径在 $7\sim 11 \mu\text{m}$ 时,数密度有微小的上升趋势,之后,数密度逐渐减小,当雾滴直径为 $20\sim 25 \mu\text{m}$ 时,数密度再次出现微弱的上升趋势,此后继续逐渐减小。不同等级雾的平均雾滴谱均为单调递减谱,数密度高值集中在较小的雾滴直径范围($2\sim 7 \mu\text{m}$),峰值直径均为 $2.8 \mu\text{m}$,说明雾滴数浓度主要由小雾滴决定。

不同等级下的雾,其雾滴谱具有明显的差异。轻雾的谱宽最窄,最大雾滴直径为 $45.5 \mu\text{m}$,大雾、浓雾、强浓雾的谱宽一致,最大雾滴直径均为 $48.5 \mu\text{m}$ 。随着雾等级的增加,雾滴谱谱线明显逐级上抬(该差异与张曦等^[8,17-18]的研究结果一致),从轻雾—大雾,谱线上抬尤为明显,表明在轻雾向大雾转变的过程中,核化和凝结增长等微物理过程活跃,数浓度增加明显(与图2a结果一致),雾滴增大,滴谱变宽。从浓雾—强浓雾,当雾滴直径 $< 20 \mu\text{m}$ 时,二者谱线几乎重合,直径超过 $20 \mu\text{m}$ 后,谱线上抬明显,表明大直径的雾滴增多会造成数密度增大,这说明该阶段仍以凝结增长过程为主,但凝结增长强度有所减弱;同时还说明,大直径雾滴数密度的增加对于海雾增强为强浓雾具有重要作用。

图3b为此次海雾过程的平均谱和拟合曲线。使用最小二乘法拟合平均雾滴谱,拟合结果表明,

表1 不同雾等级下微物理特征量的平均值和变化范围

Tab.1 Averages and ranges of microphysical properties for different levels of fog

雾的等级	数浓度平均值(变化范围)/ cm^{-3}	液态含水量平均值(变化范围)/(g/m^3)	平均直径 \bar{D} 平均值(变化范围)/ μm
轻雾	6.9(0.3~67.1)	0.000 5($2.47 \times 10^{-6} \sim 0.02$)	2.7(0.9~6.5)
大雾	23.9(1.4~73.3)	0.006($1.16 \times 10^{-5} \sim 0.03$)	4.0(2.3~8.6)
浓雾	53.3(17.4~81.1)	0.02(0.000 7~0.03)	6.4(3.7~8.8)
强浓雾	59.7(42.1~108.1)	0.02(0.006~0.05)	6.8(5.0~8.5)

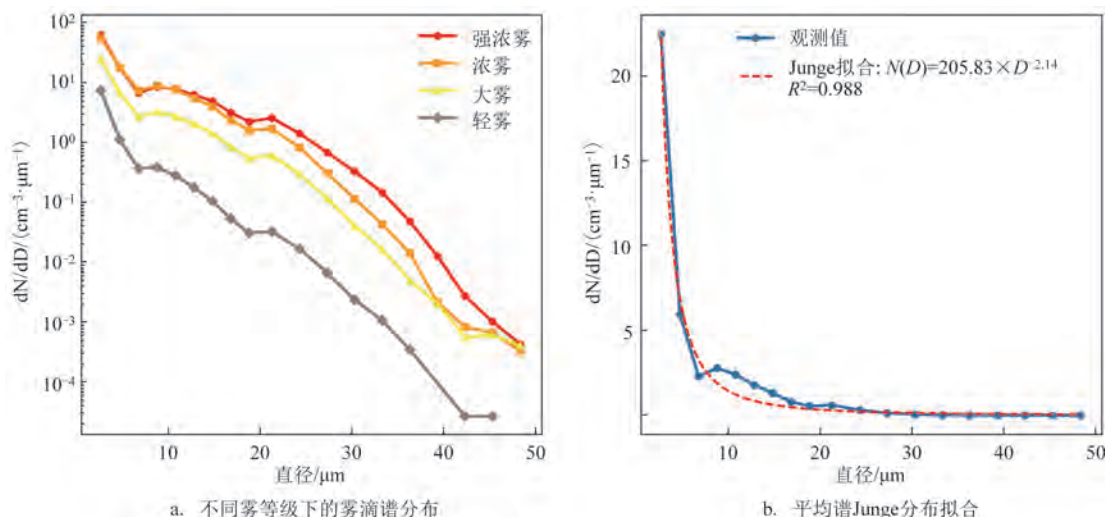


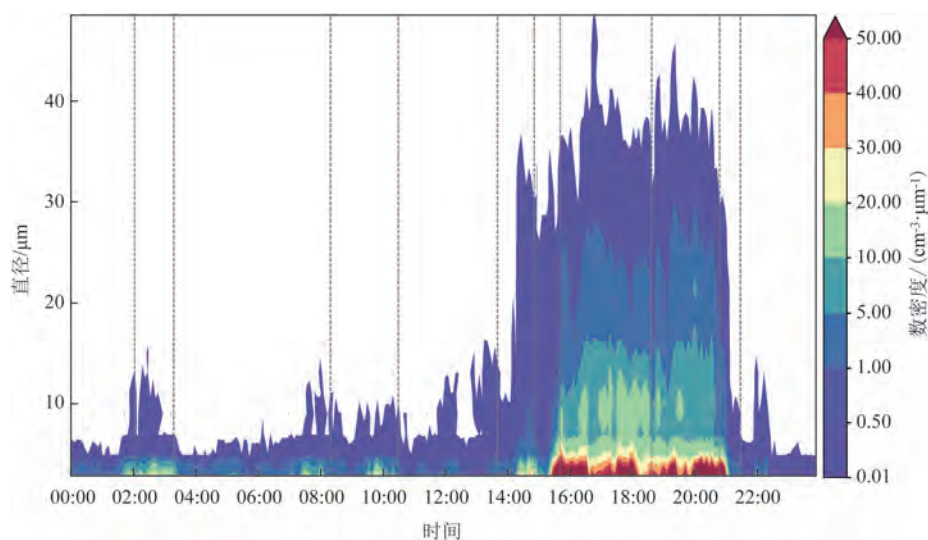
图3 雾滴谱分布。

Fig.3 Fog droplet spectrum

平均谱符合 Junge 分布, 即 $N(D)=205.83D^{-2.14}$, 拟合优度确定系数 $R^2=0.988$ 。观测值非常接近拟合曲线 (除了 $6.9\sim 15.0\ \mu\text{m}$ 的雾滴直径范围), 表明 Junge 分布函数能够准确反映这次海雾的平均状态。图 3b 还显示, 此次海雾过程的平均滴谱是单调递减的, 雾滴主要集中在 $2.8\sim 16.9\ \mu\text{m}$ 范围内, 整个谱分布偏向较小的雾滴。这与湛江海雾^[9,16]的谱分布特征类似, 而不同于舟山^[6]和厦门^[30]的海雾雾滴谱分布 (其雾滴谱更符合 Deirmendjian 分布), 说明海雾具

有明显的地域特征。

图 4 为此次海雾过程的雾滴数密度谱随时间的演变过程。从图中可以看出, 雾滴谱主要为单调递减, 仅存在短暂的双峰分布 (20:00 左右, 强浓雾等级), 并且数密度主要分布在小雾滴 (雾滴直径 $< 10\ \mu\text{m}$) 范围。相比于轻雾阶段, 大雾、浓雾、强浓雾等级的谱宽更宽, 浓雾和强浓雾阶段的数密度最大。在大雾、浓雾、强浓雾等级下, 直径 $< 10\ \mu\text{m}$ 的雾滴数密度变化显著, 且雾滴数浓度的变化主要是由该范围内雾滴



注: 灰色虚线为不同等级雾的划分, 具体划分请参见图 1

图4 不同直径下雾滴数密度随时间的演变

Fig.4 The temporal evolution of fog droplet number concentration with different diameters

数密度变化造成的^[17]。在此过程中,雾滴直径迅速增长,滴谱逐渐拓宽,其本质是雾滴增多、增大,小雾滴的数密度高,表明有大量凝结核化,水汽在较小的凝结核上凝结并迅速长大^[31]。

2.3 微物理关系

雾的微物理特征量与微物理过程密切相关,不同微物理特征量的关系可以反映出雾滴的核化、凝结和碰并等各种微物理机制。为了解影响此次海雾过程的主要微物理机制,对微物理特征量的关系进行分析。在整个过程中(见图5),数浓度与平均直径、液态含水量与平均直径、液态含水量与数浓度之间均呈强的正相关关系,相关系数分别为0.84、0.92、0.84,所有的相关性均通过显著性检验($P < 0.001$)。

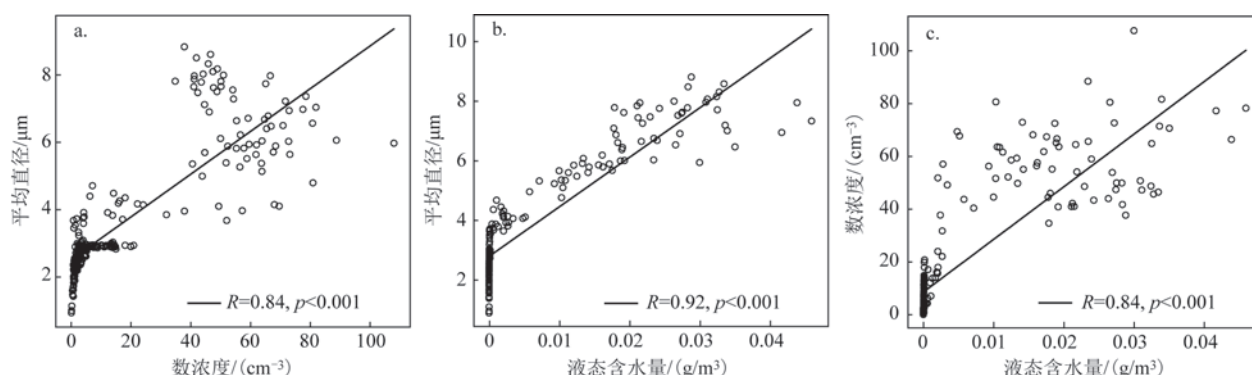
图5中3个微物理特征量之间强的正相关性可以初步反映出,整个海雾阶段的主导过程不是碰并,而是雾滴的凝结核化和凝结增长。核化凝结使小雾滴不断生成并补充,碰并使得小雾滴数量减少,如果是以碰并过程为主导,大雾滴碰并小雾滴之后,其直径会增大而数浓度减小,数浓度和平均直径之间应为负相关关系;同时大雾滴对含水量的贡献较大,会使得液态含水量增大,数浓度与液态含水量之间也应呈负相关关系^[32]。而图5显示出3个微物理特征量之前强的正相关关系,与上述预期不符。这个结论与许多云雾理论相反,后者认为云雾的增长是通过小粒子的核化然后凝结增长,再通过碰并和收集作用进一步增大雾滴尺寸^[33-35]。

为进一步了解雾过程中雾滴核化、凝结和碰并等微物理过程的变化,进一步对不同雾等级下3个微物理特征量的相关性进行分析,结果见图6和图7。在轻雾和大雾等级下,数浓度与平均直径、液态含水量与平均直径、液态含水量与数浓度之间均呈强的正相关关系,所有相关性均通过显著性检验($P < 0.001$);在浓雾和强浓雾等级下,数浓度与平均直径之间为弱的负相关关系,液态含水量与平均直径、液态含水量与数浓度之间则为正相关关系。

轻雾等级下(见图6a、7a),各微物理特征量之间均呈强的正相关关系,数浓度与平均直径、液态含水量与平均直径、液态含水量与数浓度的相关系数分别为0.72、0.68、0.82,说明轻雾中的微物理过程以核化、凝结增长为主。

大雾等级下(见图6b、7b),数浓度与平均直径、液态含水量与平均直径、液态含水量与数浓度呈强的正相关,相关性为4个海雾等级中最强的,相关系数分别为0.88、0.97、0.85。这一等级的雾中数浓度、液态含水量、平均直径同时增大,说明雾滴增多,尤其是大直径雾滴所占比例升高,说明该等级下仍以雾滴的核化和凝结增长为主且作用较强,雾滴在凝结增长的同时,凝结核也在持续核化,小液滴不断得到补充。

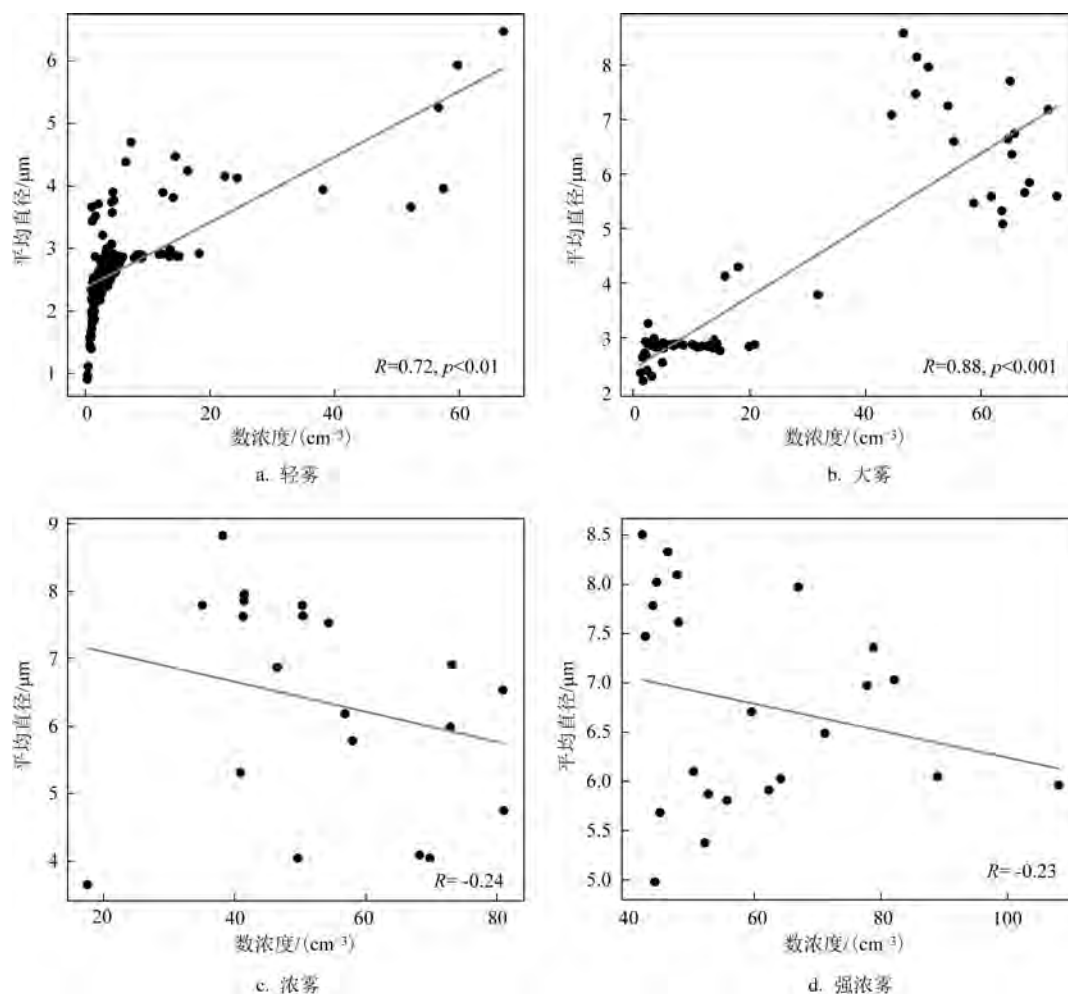
浓雾等级下(见图7c),液态含水量与平均直径之间仍然呈强的正相关,相关系数为0.90;而数浓度与平均直径之间为弱的负相关关系(未通过显著性检验),液态含水量与数浓度之间为弱的正相关关系,出现该现象的一种可能是,浓雾等级下除了核



注: R 为相关系数, p 为拒绝零假设的概率, 黑色实线为拟合曲线

图5 不同微物理特征量之间的关系

Fig.5 The relationship between different microphysical characteristics



注: R 为相关系数, 灰色实线为拟合曲线, p 为拒绝零假设的概率, 未通过显著性检验不显示 p 值

图6 不同雾等级下平均直径与数浓度的关系

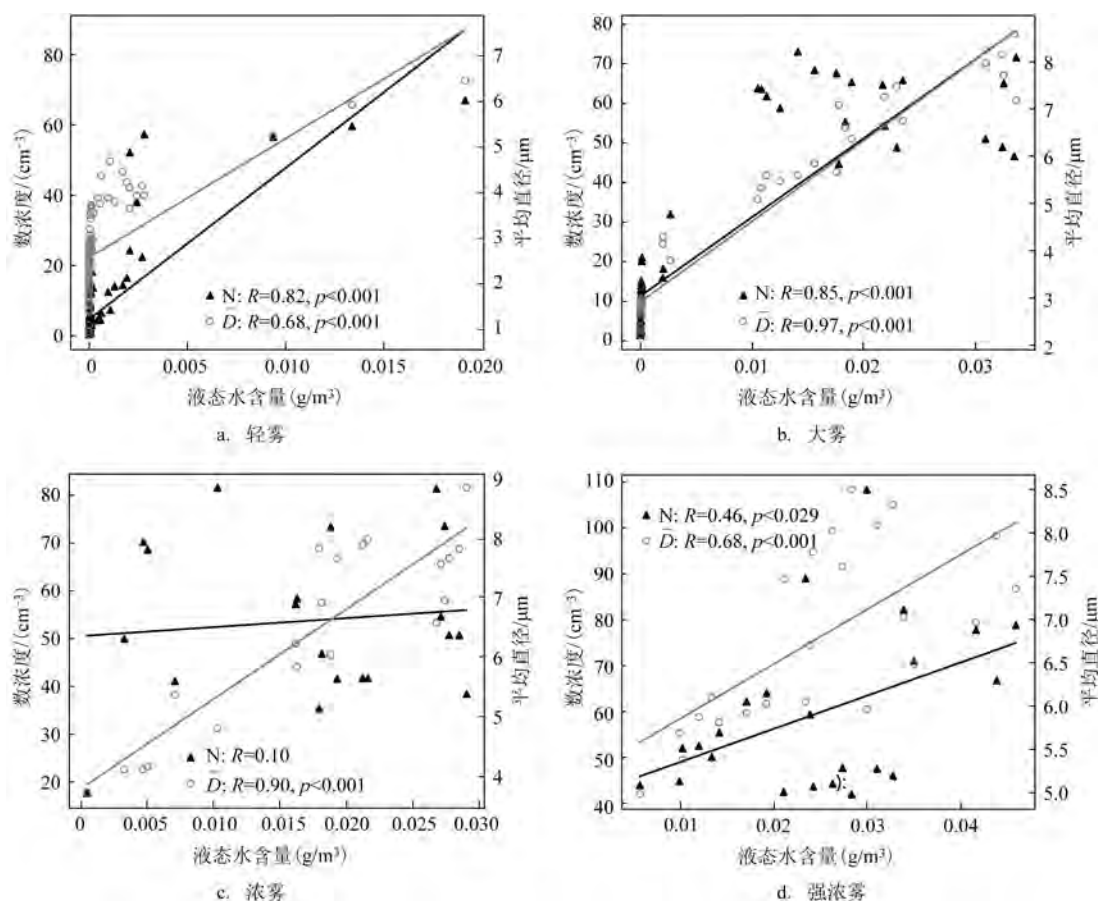
Fig.6 The relationship between average diameter and number concentration of different fog levels

化凝结外, 碰并过程也较活跃^[32]。数浓度的大小主要由小直径的雾滴来决定, 大直径雾滴碰并小直径的雾滴后, 平均直径增大, 数浓度因损失小直径的雾滴而减小(数浓度与平均直径之间呈负相关)。另一种可能是湍流作用的结果^[16], 此阶段雾在垂直方向发生了上下层交换, 促进了雾滴之间的碰并, 促进了小雾滴生长, 使数浓度增大, 而平均直径减小。

强浓雾等级下, 液态含水量与平均直径和数浓度之间仍然呈显著的正相关关系, 相关系数分别为 0.68、0.46, 而数浓度与平均直径为弱的负相关关系, 说明在该强度的雾下, 雾滴的核化凝结增长与碰并过程仍然并存, 大雾滴通过碰并收集小液滴而增长, 数浓度减少, 同时可能还存在雾滴蒸发过程,

形成的小雾滴再次回到雾体, 使数浓度增加。

综上, 从轻雾—强浓雾, 3 个微物理特征量之间的相关关系大致从较强的正相关到负相关再到弱的正相关, 碰并作用逐渐增强, 各特征量之间的正相关性不断被削弱。大雾和轻雾等级下, 雾滴的凝结核化和增长是主要的微物理过程; 浓雾和强浓雾等级下, 雾滴的凝结核化、凝结增长和碰并过程共存, 表现为数浓度与平均直径之间弱的负相关关系, 这与大多数研究结论一致^[19,15,30]。此外, 湍流活动在雾生消过程中的作用不容忽视, 它促进了雾生命周期中水汽和热量的交换, 但对于其影响研究仍需要更多观测数据的支持, 凝结核化、凝结增长和碰并作用的贡献也有待进一步研究。



注:黑色实心三角形和黑色实线为数浓度(N)与液态含水量(LWC)的关系,灰色空心圆圈和灰色实线为平均直径(\bar{D})与液态含水量(LWC)的关系, R 为相关系数, p 为拒绝零假设的概率,未通过显著性检验不显示 p 值

图7 不同雾等级下液态含水量分别与数浓度和平均直径的关系

Fig.7 The relationship between liquid water content and number concentration and average diameter of different fog levels

3 结论

利用2021年春季在钦州观测到的雾滴谱数据和常规气象观测资料,分析了轻雾、大雾、浓雾和强浓雾4个等级下的微物理特征、雾滴谱分布及微物理关系,探讨不同海雾等级下的微物理过程。结论如下:

①随着雾等级的增加(轻雾—强浓雾),数浓度、液态含水量和平均直径的平均值呈现增大的趋势,强浓雾最大,浓雾次之,轻雾最小;从轻雾—强浓雾,最大数浓度也呈增加趋势,而最大液态含水量和最大平均直径并未随雾等级的增加而增大。在强浓雾中,微物理特征量起伏变化最大,数浓度和液态含水量的最大值出现强浓雾中,而平均直径

的最大值出现在浓雾中。数浓度、液态含水量及平均直径随时间的变化趋势具有高度的一致性,在轻雾、大雾和浓雾中,各微物理特征量与能见度的变化趋势相反,但在强浓雾中,相关的对应关系不明显。

②不同等级下雾的谱分布特征具有明显的差异,从轻雾—强浓雾,雾滴谱谱线逐级抬升,从轻雾—大雾,谱线上抬尤为明显,从浓雾—强浓雾,直径20 μm 以上雾滴的谱线上抬明显;大雾、浓雾、强浓雾的谱宽一致,最大雾滴直径均为48.5 μm ,轻雾的谱宽最窄,最大雾滴直径为45.5 μm 。钦州海雾的雾滴谱呈现单调递减分布,平均谱满足Junge分布,峰值位于2.8 μm ,整个谱分布偏向于较小的雾滴,雾滴多集中于小滴。

③凝结核化、凝结增长是北部湾海雾最主要的微物理过程,在整个雾过程中发挥主导作用,使数浓度与平均直径、液态含水量与平均直径、液态含水量与数浓度之间均呈强的正相关关系。轻雾和大雾等级下,凝结核化和凝结增长是主要微物理过程,碰并过程很少发生,各微物理特征量之间为强的正相关关系;浓雾和强浓雾等级下,雾滴的核化、凝结增长、碰并增长并存,雾滴数浓度与平均直径呈弱的负相关关系。

参考文献:

- [1] 王彬华. 海雾[M]. 北京: 海洋出版社, 1983: 2-4.
WANG B H. Sea fog[M]. Beijing: Ocean Press, 1983: 2-4.
- [2] ELDRIDGE R G. A few fog drop-size distributions[J]. *Journal of Meteorology*, 1961, 18(5): 671-676.
- [3] GOODMAN J. The microstructure of California Coastal fog and stratus[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1977, 16(10): 1056-1067.
- [4] WENDISH M, MERTES S, HEINTZENBERG J, et al. Drop size distribution and LWC in Po Valley fog[J]. *Contributions to Atmospheric Physics*, 1998, 71(1): 87-100.
- [5] ABIDA R, NELLI N, FRANCIS D, et al. Microphysics of radiation fog and estimation of fog deposition velocity for atmospheric dispersion applications[J]. *EGU sphere*, 2023.
- [6] 杨中秋, 许绍祖, 耿骝. 舟山地区春季海雾的形成和微物理结构[J]. *海洋学报*, 1989, 11(4): 431-438.
YANG Z Q, XU S Z, GENG B. Formation and microphysical structure of spring sea fog in Zhoushan area[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1989, 11(4): 431-438.
- [7] 黄辉军, 黄健, 刘春霞, 等. 茂名地区海雾的微物理结构特征[J]. *海洋学报*, 2009, 31(2): 17-23.
HUANG H J, HUANG J, LIU C X, et al. Microphysical characteristics of the sea fog in Maoming area[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(2): 17-23.
- [8] 张曦, 牛生杰, 魏锦成, 等. 厦门春季海雾天气分类及典型个例宏观结构分析[J]. *气象科学*, 2016, 36(1): 121-127.
ZHANG X, NIU S J, WEI J C, et al. Classification and case study of macro and micro structures of spring sea fog in Xiamen[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2016, 36(1): 121-127.
- [9] 吕晶晶, 牛生杰, 张羽, 等. 湛江东海岛一次春季海雾的宏观结构及边界层演变特征[J]. *气象学报*, 2014, 72(2): 350-365.
LYU J J, NIU S J, ZHANG Y, et al. Evolution characteristics of the macro-/micro-structure and the boundary layer during a spring heavy sea fog episode in Donghai Island in Zhanjiang[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(2): 350-365.
- [10] 徐峰, 王晶, 张羽, 等. 粤西沿海海雾天气气候特征及微物理结构研究[J]. *气象*, 2012, 38(8): 985-996.
XU F, WANG J, ZHANG Y, et al. Analysis on the climatic and microphysical characteristics of sea fog over the coast of west Guangdong[J]. *Meteorological Monthly*, 2012, 38(8): 985-996.
- [11] GULTEPE I, TARDIF R, MICHAELIDES S C, et al. Fog research: a review of past achievements and future perspectives[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2007, 164(6): 1121-1159.
- [12] ROACH W T. On the effect of radiative exchange on the growth by condensation of a cloud or fog droplet[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1976, 102(432): 361-372.
- [13] HE J X, REN X Y, WANG H, et al. Analysis of the Microphysical structure and evolution characteristics of a typical sea fog weather event in the eastern sea of China[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5604.
- [14] 徐峰, 韩利国, 吕晶晶, 等. 南海西北部一次海上海雾的微物理及化学特性分析[J]. *热带气象学报*, 2019, 35(5): 596-603.
XU F, HAN L G, LYU J J, et al. Analysis on microphysical and chemical characteristics of a sea fog on the sea surface in the northwestern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2019, 35(5): 596-603.
- [15] 岳岩裕, 牛生杰, 赵丽娟, 等. 湛江地区近海岸雾产生的天气条件及宏微观特征分析[J]. *大气科学*, 2013, 37(3): 609-622.
YUE Y Y, NIU S J, ZHAO L J, et al. Study on the synoptic system and macro-micro characteristics of sea fog along the Zhanjiang coastal area[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(3): 609-622.
- [16] 张舒婷, 牛生杰, 赵丽娟. 一次南海海雾微物理结构个例分析[J]. *大气科学*, 2013, 37(3): 552-562.
ZHANG S T, NIU S J, ZHAO L J. The microphysical structure of fog droplets in a sea fog event in the South China Sea[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(3): 552-562.
- [17] 祖繁, 袁成松, 吴泓, 等. 江苏北部不同等级雾的微物理结构及个例分析[J]. *气象学报*, 2020, 78(4): 691-704.
ZU F, YUAN C S, WU H, et al. Microphysical structure of fog droplets in different levels of fog and a case study in northern Jiangsu province[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, 78(4): 691-704.
- [18] 王庆, 樊明月, 李季, 等. 济南冬季雾的微物理结构及其对能见度的影响[J]. *大气科学*, 2021, 45(2): 333-354.
WANG Q, FAN M Y, LI J, et al. The microphysical characteristics of winter fog in Ji'nan and its effect on visibility[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2021, 45(2): 333-354.
- [19] 张浩, 石春娥, 杨军, 等. 寿县不同强度雾的微物理特征及其与能见度的关系[J]. *大气科学*, 2021, 45(6): 1217-1231.
ZHANG H, SHI C E, YANG J, et al. Microphysical characteristics of fog with different intensities and their relationship with visibility in Shouxian County[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2021, 45(6): 1217-1231.
- [20] 郑凤琴, 周绍毅, 韦晶晶, 等. 北部湾海雾特点及海陆大雾差异分析[J]. *气象科技*, 2020, 48(5): 717-722.

- ZHENG F Q, ZHOU S Y, WEI J J, et al. Characteristics of sea fogs in Beibu Gulf and differences between heavy fogs over sea and land[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2020, 48(5): 717-722.
- [21] 郑凤琴, 罗小莉, 钟利华, 等. 北部湾地区海雾特点的初步分析[J]. *应用海洋学学报*, 2021, 40(2): 324-331.
- ZHENG F Q, LUO X L, ZHONG L H, et al. Preliminary analysis of sea fog characteristics over Beibu Gulf area[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2021, 40(2): 324-331.
- [22] GONSER S G, KLEMM O, GRIESSBAUM F, et al. The relation between humidity and liquid water content in fog: an experimental approach[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2012, 169(5-6): 821-833.
- [23] GULTEPE L, PEARSON G, MILBRANDT J A, et al. The fog remote sensing and modeling field project[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(3): 341-360.
- [24] NIU S J, LU C S, LIU Y G, et al. Analysis of the microphysical structure of heavy fog using a droplet spectrometer: a case study[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, 27(6): 1259-1275.
- [25] 张悦, 樊曙先, 张舒婷, 等. 海峡西岸一次雾过程微结构及其起伏特征研究[J]. *热带气象学报*, 2015, 31(3): 385-394.
- ZHANG Y, FAN S X, ZHANG S T, et al. The microstructure and characteristics of fluctuation of a sea fog along the west coast of Taiwan Strait[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2015, 31(3): 385-394.
- [26] 吕晶晶, 牛生杰, 赵丽娟, 等. 湛江地区一次冷锋型海雾微物理特征[J]. *大气科学学报*, 2014, 37(2): 208-215.
- LYU J J, NIU S J, ZHAO L J, et al. Microphysical characteristics of a sea fog influenced by a cold front in Zhanjiang[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2014, 37(2): 208-215.
- [27] 张曦. 厦门春季海雾宏观结构观测分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
- ZHANG X. Study of macro and micro structures of spring sea fog in Xiamen[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2015.
- [28] 陆芊芊, 郑凤琴, 毕瑞迪, 等. 2021年涠洲岛4次海雾外场观测数据分析[J]. *气象研究与应用*, 2022, 43(3): 20-25.
- LU Q Q, ZHENG F Q, BI R D, et al. Analysis of four outfield observation data of sea fog on Weizhou Island in 2021[J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2022, 43(3): 20-25.
- [29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 27964-2011 雾的预报等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 27964-2011 Grade of fog forecast[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [30] 张伟, 陈德花, 胡雅君, 等. 闽南沿海一次春季海雾过程微物理特征分析[J]. *气象*, 2021, 47(2): 157-169.
- ZHANG W, CHEN D H, HU Y J, et al. Microphysical structure analysis of a spring sea fog event in southern coastal area of Fujian[J]. *Meteorological Monthly*, 2021, 47(2): 157-169.
- [31] 李晓娜, 黄健, 申双和, 等. 一次高压型海雾中的液态含水量演变特征[J]. *热带气象学报*, 2010, 26(1): 79-85.
- LI X N, HUANG J, SHEN S H, et al. Evolution characteristics of liquid water content for a high-pressure pattern of sea fog[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2010, 26(1): 79-85.
- [32] LU C S, LIU Y G, NIU S J, et al. Examination of microphysical relationships and corresponding microphysical processes in warm fogs[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, 27(6): 832-848.
- [33] 李子华, 黄建平, 周毓荃, 等. 1996年南京连续5天浓雾的物理结构特征[J]. *气象学报*, 1999, 57(5): 622-631.
- LI Z H, HUANG J P, ZHOU Y Q, et al. Physical structures of the five-day sustained fog around Nanjing in 1996[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, 57(5): 622-631.
- [34] 唐浩华, 范绍佳, 吴兑, 等. 南岭山地浓雾的微物理结构及演变过程[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2002, 41(4): 92-96.
- TANG H H, FAN S J, WU D, et al. Research of the microphysical structure and evolution of dense fog over Nanling mountain area[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2002, 41(4): 92-96.
- [35] 黄健, 王斌, 周发琇, 等. 华南沿海暖海雾过程中的湍流热量交换特征[J]. *大气科学*, 2010, 34(4): 715-725.
- HUANG J, WANG B, ZHOU F X, et al. Turbulent heat exchange in a warm sea fog event on the coast of South China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 34(4): 715-725.

Microphysical characteristics of sea fog across different grades in the Beibu Gulf: A case study of Qinzhou

LU Qianqian¹, ZHENG Fengqin^{1*}, LI Guangtao¹, WEI Meinao²

(1. Guangxi Climate Center, Nanning 530022, China; 2. Qinzhou Meteorological Bureau, Qinzhou 535009, China)

Abstract: Utilizing fog droplet spectrum data observed in Qinzhou during the spring of 2021, the microphysical characteristics under four fog levels, i.e. mist, fog, dense fog, and extremely dense fog (abbreviated as exdense fog), are analyzed to explore the microphysical processes at different sea fog levels. The results show that, along with the increase of sea fog level, the mean values of droplet number concentration, liquid water content, and average diameter, as well as the maximum value of number concentration, gradually increase, and the maximum average diameter appears at the dense fog level; The fog droplet spectrum shows a monotonically decreasing distribution, conforming to the Junge distribution. From light fog to exdense fog, the spectrum lines of the fog droplet spectrum rise step by step. The spectrum width of light fog is the narrowest, while the spectrum widths of fog, dense fog, and exdense fog are consistent, with the maximum droplet diameter being 48.5 μm . Under light fog and fog levels, nucleation and condensation growth are the main microphysical processes, with strong positive correlations among various microphysical characteristics. Under dense fog and exdense fog levels, nucleation, condensation growth, and collision-coalescence growth coexist, resulting in a weak negative correlation between number concentration and average diameter.

Key words: sea fog; fog levels; microphysical characteristics; fog droplet spectrum; microphysical correlation