

# 基于船载自动气象站的海上降雨特点分析

王金平, 吴炎成, 聂永来

中国卫星海上测控部, 江苏 江阴

Email: wu\_yc1989@163.com

收稿日期: 2021年4月30日; 录用日期: 2021年5月30日; 发布日期: 2021年6月11日

## 摘要

通过船载自动气象站雨量计记录的两个航次高分辨率降雨资料, 对太平洋、印度洋和大西洋的热带和副热带海域海上降雨的频率、强度和时间分布规律进行了统计, 结果显示在这两个航次中, 热带辐合云系是造成高强度降水的主要天气系统, 海上有降雨的天数约占45.2%, 以阵性降雨为主, 从凌晨4点到下午15点下雨的概率相对较大。结合自动气象站同步记录的其他气象要素和船载多普勒天气雷达回波资料, 对一次典型海上降雨过程进行了分析, 发现在降雨期间会有明显的能见度下降, 大气温湿度和海表皮温也会在降雨期间产生明显变化, 多普勒天气雷达回波强度可以比较直观地显示出雨区大小、方位和距离。

## 关键词

海上降雨, 自动气象站, 雨量计

# Analysis of the Characteristics of Rainfall at Sea Based on the Ship-Borne Automatic Weather Station

Jinping Wang, Yancheng Wu, Yonglai Nie

China Satellite Marine Monitoring and Control Department, Jiangyin Jiangsu

Email: wu\_yc1989@163.com

Received: Apr. 30<sup>th</sup>, 2021; accepted: May 30<sup>th</sup>, 2021; published: Jun. 11<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Based on the high-resolution rainfall data recorded by the ship-borne automatic weather station

rainfall gauge in two voyages, the frequency, intensity and time distribution of rainfall in tropical and subtropical areas of the Pacific Ocean, the Indian Ocean and the Atlantic Ocean are statistically analyzed. The results show that in these two voyages, the tropical convergence cloud system is the main weather system that causes high-intensity rainfall, and the number of days with rainfall at sea accounts for about 45.2%, which is dominated by intermittent rainfall. The probability of intermittent rainfall is relatively large from 4:00 a.m. to 15:00 p.m. Combined with other meteorological elements synchronously recorded by automatic weather station and ship-borne Doppler weather radar echo data, a typical rainfall process at sea is analyzed. It is found that there will be a significant decrease in visibility during rainfall, and the atmospheric temperature, humidity and sea surface temperature will also change significantly during the rainfall process. The echo intensity of Doppler weather radar can intuitively show the size, orientation and distance of the rain area.

## Keywords

Rainfall at Sea, Automatic Weather Station, Rain Gauge

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

海洋占地球表面积 70% 以上, 海洋中水含量占地球上水总量的 90% 以上, 在水的循环过程中, 海洋上的海水蒸发、海上降雨占有重要比例, 并且极大地影响了全球的天气发展变化。海上降雨的发生机制也与陆地上降雨存在很多区别, 比如热带海洋上的空气非常湿润且相对干净, 凝结核少, 但是吸湿性强, 其充沛的降水常常来自远低于冻结高度的云, 雨滴的形成以碰并过程为主[1]。

海洋气象观测数据及统计产品是开展海洋气象预报、制作海洋气候背景以及科学研究、工程建设的基础和重要参考[2] [3]。然而, 与观测站点星罗棋布的陆地不同, 海上观测站十分稀少, 而且空间分布极不均匀[4] [5]。目前海上的降雨资料主要为通过遥感技术得到的反演资料[6]。由于雨量测量相对温湿压等气象要素的测量更加复杂, 船舶等海上平台不可避免会产生摇摆, 传统的收集式雨量计难以有效对海上降雨进行测量。王乃敏[7]早在 1994 年提出了采用一种光闪烁雨量计进行海上降雨的测量, 该雨量计通过分析雨滴造成的观光版上的光闪烁进行降雨测量, 但是这种光学雨量计目前并没有得到普遍采用, 海上降雨资料依然缺乏[8]。

正因为如此, 对于海上降雨的特点展开的研究很少, 目前相关研究主要集中在海上降雨引起的水下噪声[9]以及电磁波的雨衰方面[10]。近年来, 随着海上测控技术的发展, Ka 波段等电磁波段的卫星通信雷达和测控雷达越来越多地应用在远洋航天测量船上, Ka 波段电磁波在传输过程中会收到降雨影响产生信号衰减, 对通信和测控任务造成影响[11]。因而, 收集并研究分析海上降雨资料对于研究天气系统和保障海上测控通信任务都具有十分重要的作用。

## 2. 观测设备与资料简介

### 2.1. 观测设备与资料简介

本文采集的数据使用的是长春华信公司生产的船载自动气象站, 其安装了美国 Young 公司生产的

50202 型雨量计，这是一种适用于浮标和船舶等不稳定移动平台的雨量计。车载自动气象站含有测量降雨量、风向风速、气温、海表皮温、大气湿度、气压和能见度的各类传感器，本文中采用了降雨量、气温、大气湿度、海表皮温数据，相关传感器的主要技术指标如表 1 所示。

**Table 1.** Main technical indicators of automatic weather station sensors

**表 1.** 自动气象站传感器主要技术指标

序号	测量参数	传感器生产商	传感器型号	测量范围	分辨率	测量准确度
1	降雨量	Young	50202	$\geq 1$ mm	1 mm	1 mm
2	气温	E + E	EE180	$-40 \sim +60$ °C	0.1 °C	$\pm 0.2$ °C
3	湿度	ELEKTRONIK		0~100% RH	1% RH	$\pm 2\%$ RH ( $\leq 90\%$ RH) $\pm 3\%$ RH ( $> 90\%$ RH)
4	能见度	VAISALA	PWD	10~20000 m	10 m	$\leq 10000$ m, $\pm 10\%$ $> 10000$ m, $\pm 15\%$
5	海表皮温	Raytek Corporation	MI3	$-5 \sim +35$ °C	0.1 °C	2 °C

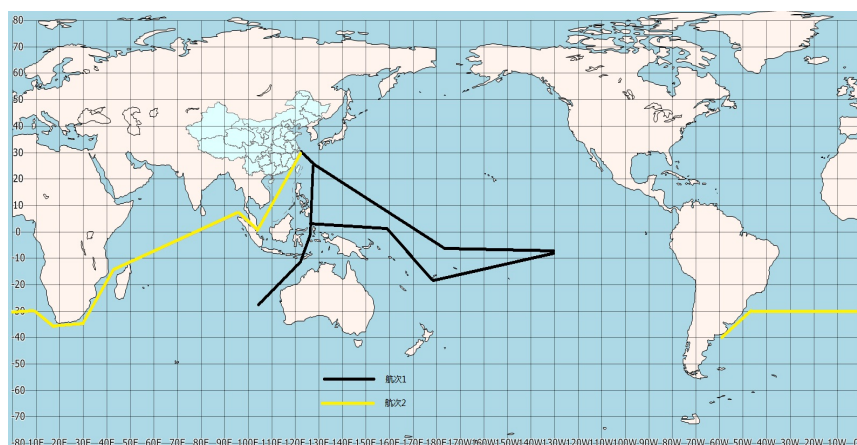
## 2.2. 资料介绍

车载自动气象站收集的资料包括日雨量数据、温度数据、湿度数据、气压数据、能见度数据、海表皮温数据、风速风向资料，资料的时间分辨率为 1 分钟。原始数据资料时间均为北京时，考虑到时差的影响，本文中已经根据船舶地理位置转换为当地时间。通过日雨量随时间的变化可以计算出降雨时间和强度。

## 3. 海上降雨特点分析

### 3.1. 日雨量资料分析

本文统计了 2019 年 11 月 10 日至 2020 年 1 月 18 日和 2020 年 2 月 28 日至 6 月 6 日两个航次，共 139 天数据样本。空间范围航次 1 主要为太平洋热带地区，另外还有印度洋澳大利亚以西海域的热带和副热带海区、印尼内海、中国东海，经度范围从 100°E 到 130°W，纬度范围从 30°N 到 30°S；航次 2 包括了印度洋、中国南海、印度洋和大西洋的热带和副热带海区，经度范围从 55°W 到 120°E，即从乌拉圭拉普拉塔河口到中国长江口，纬度范围从 30°N 到 40°S，如图 1 所示。数据样本空间范围除太平洋 130°W 以东海域外，几乎绕地球一圈。



**Figure 1.** Schematic diagram of ship route (black solid line: route one; yellow solid line: route two)  
**图 1.** 船舶航线示意图(黑色实线：航次一；黄色实线：航次二)

图2为两个航次日雨量随时间分布图，可以看出，航次1有三次降水高峰期，其中第一次是2019年11月21日在印度洋受高压底部阴雨天气影响，降水时间从当地时间凌晨4点陆陆续续持续到下午14点和晚上20点到22点两个时间段，其中最大降水强度在6时至7时，一小时降水量到17 mm；第二次为2019年12月14日至19日在斐济附近海域受热带辐合云系影响，降水比较频繁，且降雨量较大；第三次是为2020年1月7日至11日也是受低纬度辐合云系影响，降雨量较大，最大降雨强度为一小时降雨19 mm。航次2降水天数和强度明显比航次1偏少，其中2020年4月30日至5月30日一个月内未记录到有降水，这可能跟航次2大部分时间在副热带海域有关。由于船舶会主动规避热带气旋和温带气旋等灾害性天气系统，因此，该数据中不包括热带气旋和温带气旋等天气系统的情况。因此，海上强度较大的降水主要发生在热带辐合带地区，热带辐合云系是造成高强度降水的主要天气系统之一。

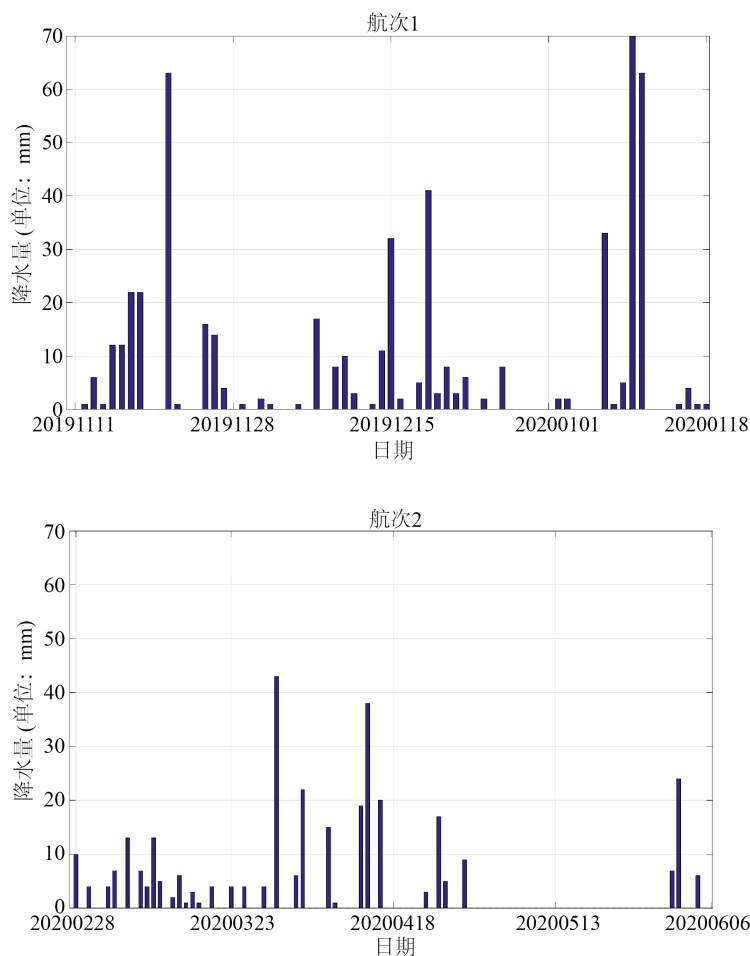


Figure 2. Daily rainfall time distribution map (unit: mm)  
图2. 日雨量时间分布图(单位: mm)

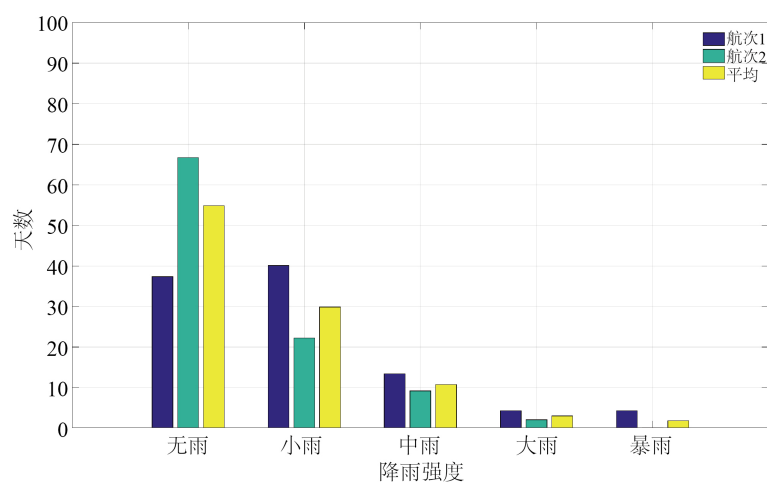
从表2和图3可以看出，海上降雨比较频繁，记录没有降雨的天数只占所有观测天数的54.8%，其中以日雨量小于10 mm的小雨为主，在海上主要表现为阵性降水，这往往是单体积云性降水；降雨量为10~24 mm，达到中雨级别的天数占10.7%；达到25~50 mm的大雨级别的天数占3%；达到50 mm以上的暴雨级别的天数占1.8%，这一般是船舶在穿越云带时产生的，降雨时间也比较长，同一天降雨次数比较多。其中航次1虽然比航次2少30天，但是记录到的有降水的日期还要略多，尤其是3次暴雨级别的

降水全都在航次 1，主要原因是因为航次 1 在热带辐合带区域的时间更多。

**Table 2.** Frequency of precipitation intensity distribution

**表 2.** 降水强度分布频率

航次	无雨		小雨		中雨		大雨		暴雨		合计
	次数	占比	次数	占比	次数	占比	次数	占比	次数	占比	
1	26	37.30%	28	40.10%	9	13.40%	3	4.30%	3	4.30%	69
2	66	66.70%	22	22.20%	9	9.10%	2	2.00%	0	0	99
总	92	54.80%	50	29.80%	18	10.70%	5	3.00%	3	1.80%	168



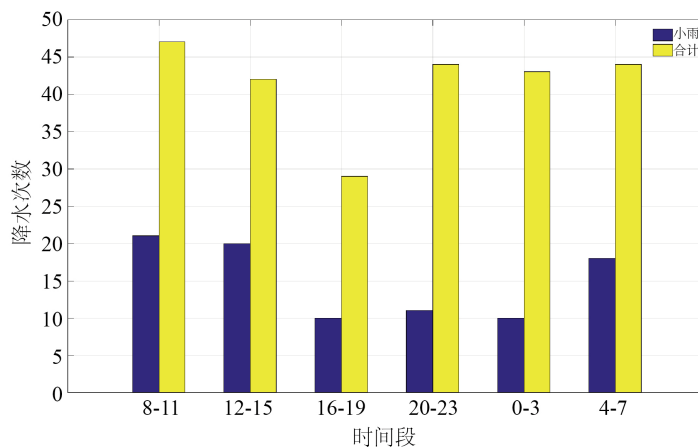
**Figure 3.** Rainfall intensity distribution frequency (the abscissa is the daily rainfall, unit: mm; the ordinate is the number of days)

**图 3.** 降雨强度分布频率(横坐标为日雨量, 单位: mm; 纵坐标为天)

在我们一般的认识中, 白天海水受太阳照射, 水温和气温都升高, 海水的蒸发加快, 同时空气受热产生上升运动, 积云逐渐发展, 到下午和傍晚的时候, 积云发展最盛, 下雨的概率最大。图 4 统计了降水时间的分布情况, 其中的时间均为当地时间, 这里先将每分钟一组的降水数据转换成每小时一组, 取该小时最后时刻的降水量值为该小时的降水量值, 若某一个小时的降水量较上一个小时增加不到 1 mm, 则认为该小时无降雨, 否则, 认为该小时内有降雨。降雨时间段分布频率 16~19 时降水次数较少, 其余时间段相差不大。但是由于积云性降水往往降雨时间多, 降水量较小, 如果只计算小雨的时间段分布, 发现 04 时至 15 时的降水概率明显大于 16 时至 03 时, 即从凌晨 4 点到中午 15 点下雨的概率要大于下午和傍晚。因此, 本次的统计事实并不支持海上下午和傍晚下雨概率大的观点。这可能与夜间云顶的辐射冷却有关, 夜间云顶辐射的热量损失会增加不稳定性而使云继续发展[12]。

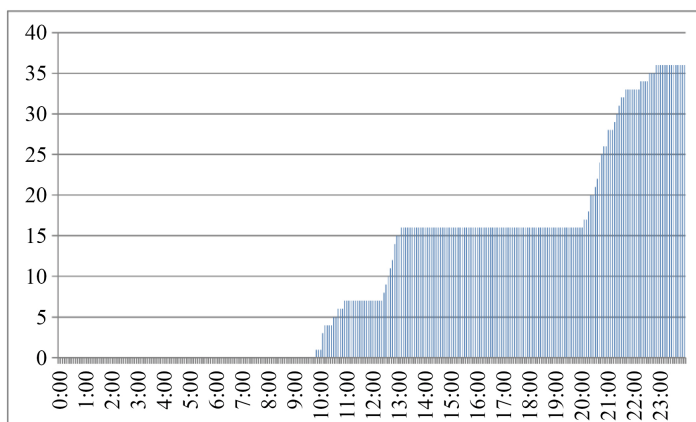
### 3.2. 降雨强度与其他气象要素的变化关系

为便于比较, 本文选取某一天的情况进行降雨强度和其他气象要素的变化关系对比, 从图 5 可以看出, 该日共有 3 次降雨过程, 第一次从 09:40~11:00, 共产生降雨 7 mm, 降水强度为 5.3 mm/h; 第二次从 12:15~13:10, 共产生降雨 9 mm, 降水强度为 9.8 mm/h; 第三次从 19:55~22:55, 共产生降雨 20 mm, 降水强度为 6.7 mm/h; 全天共降雨 36 mm, 达到大雨级别。



**Figure 4.** Distribution frequency of rainfall time period (abscissa is the rainfall time period; Ordinate is the rainfall frequency)

**图 4.** 降雨时间段分布频率(横坐标为降雨时间段; 纵坐标为降水次数)



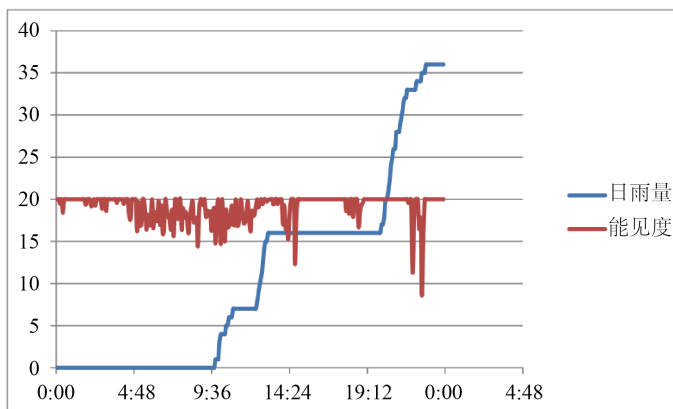
**Figure 5.** Histogram of changes in daily rainfall with time (abscissa is Beijing time; ordinate is daily rainfall, unit: mm)

**图 5.** 日雨量随时间变化柱状图(横坐标为北京时间; 纵坐标为日雨量, 单位: mm)

从图 6 可以看出, 由于大洋中空气洁净, 能见度数值一般为最大值 20 km, 但是在降雨期间会有明显的能见度下降, 然而能见度的下降和日雨量的变化并不精确对应, 而是在降雨开始前和结束后也会断断续续出现。造成这种现象有可能是降雨的前期会开始飘着毛毛雨, 此时因为降雨强度非常弱, 所以日雨量没有变化, 但是能见度已经开始下降; 而雨后情形也是如此, 虽然降雨已经结束, 但是由于空气中水汽含量还很高, 所以能见度也会下降。计算三个阶段能见度平均值, 分别为 17.5 km, 19.6 km 和 19.1 km; 能见度最小值分别为 14.7 km, 18.2 km 和 11.3 km。

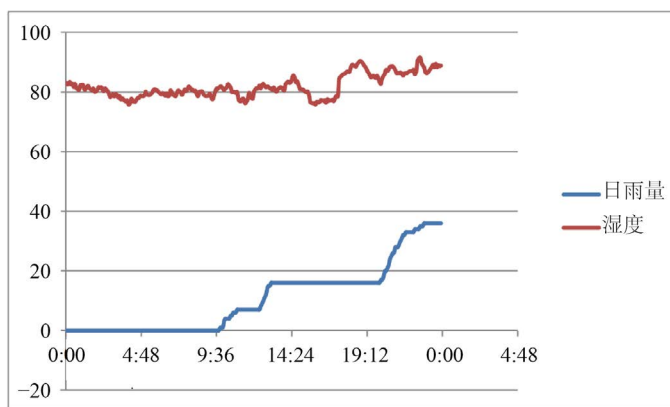
从图 7 可以看出, 大气湿度在第三次降雨期间有一个明显的变大的过程, 而在前两次降雨过程中大气湿度的变化不明显, 这可能是由于第三次降雨量较大, 持续时间较长, 而前两次降雨量较小, 持续时间较短。

一般我们认为, 降雨能造成水温和气温的降低, 从图 8 可以看出, 气温确实存在两次下降过程, 第一次降温过程发生在前两次降雨结束之后, 气温从 30°C 下降了 2.5°C 左右, 然后在 1 小时左右升温至 29.5°C, 在开始第三次降雨前 2 小时又开始降温至 27.5°C 左右并且一直维持在该温度。第一次降温过程发生在中



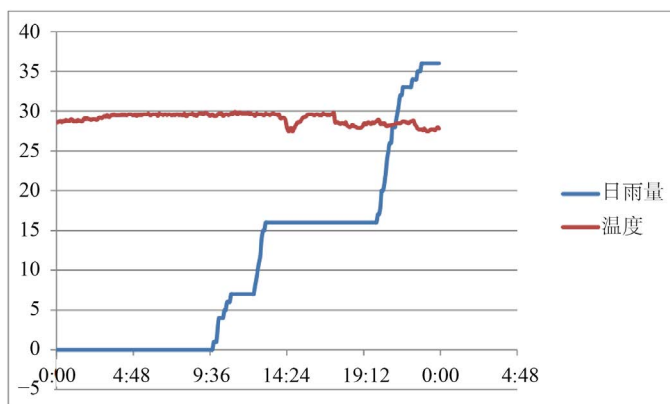
**Figure 6.** Daily rainfall and visibility changes with time (abscissa is Beijing time; ordinate is daily rainfall (unit: mm) and visibility (km))

**图 6.** 日雨量和能见度随时间变化曲线图(横坐标为北京时间; 纵坐标为日雨量(单位: mm)和能见度(km))



**Figure 7.** Daily rainfall and atmospheric humidity changes with time (the abscissa is Beijing time; the ordinate is the daily rainfall (unit: mm) and humidity (%))

**图 7.** 日雨量和大气湿度随时间变化曲线图(横坐标为北京时间; 纵坐标为日雨量(单位: mm)和湿度(%))

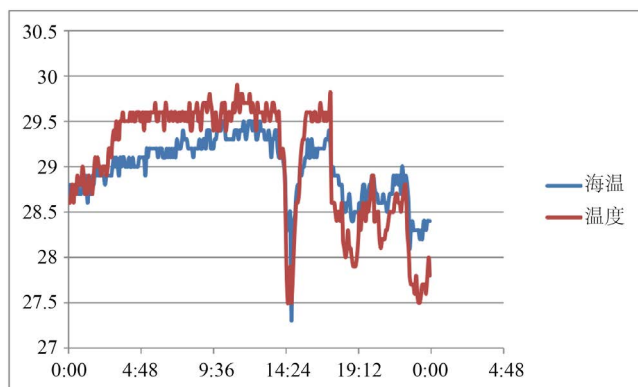


**Figure 8.** The curve of daily rainfall and atmospheric temperature with time (the abscissa is Beijing time; the ordinate is the daily rainfall (unit: mm) and temperature (°C))

**图 8.** 日雨量和大气温度随时间变化曲线图(横坐标为北京时间; 纵坐标为日雨量(单位: mm)和温度(°C))



午 14:24 左右, 这显然与降雨有关, 并且降雨停止后在光照作用在温度又升高, 第二次降温发生在晚上 19:00 以后, 而且由于晚上没有光照, 所以降温后气温不再上升。两次降温幅度都为  $2.5^{\circ}\text{C}$ , 而且 24:00 时与 00:00 时相比温度要低  $1^{\circ}\text{C}$ , 这也可以认为是由这次降雨引起的。降雨不仅会降低气温, 同时也会降低海表皮温, 图 9 显示了红外海温和大气温度随时间变化曲线图, 可以看出海表皮温变化趋势与大气温度变化一致, 但是变化的速度要慢, 幅度要小, 这是海水的比容要大于大气的原因为。其中, 14:24 左右的海表面温度和大气温度都有一个较大的降幅, 然后迅速回升, 其原因可能是因为 14:24 左右瞬时降雨强度较大(见图 8), 温度较低的雨水在短时间降低了海表面温度和大气温度。

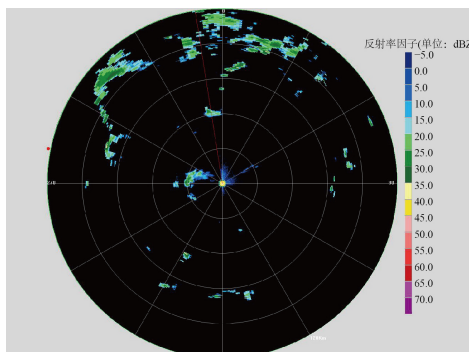


**Figure 9.** Infrared sea temperature and atmospheric temperature change with time (abscissa is Beijing time; ordinate is daily rainfall (unit: mm) and temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ))

**图 9.** 红外海温和大气温度随时间变化曲线图(横坐标为北京时间; 纵坐标为日雨量(单位: mm)和温度( $^{\circ}\text{C}$ ))

### 3.3. 降雨强度与多普勒天气雷达回波强度的变化关系

多普勒天气雷达可以用于降水的临近预报, 能够直观的显示雨区的形态与强度[13]。由于多普勒天气雷达存在一定的仰角限制, 在头顶存在回波盲区, 因此选取了 18:32 的雷达回波图进行分析, 即船舶进入雨区之前, 如图 10 所示。此时在船舶航行方向距离 5~25 公里处监测到一片回波区, 回波强度为 10~30 dbz, 回波区域呈不规则的椭圆形, 空间尺度为 20 km 左右, 为典型的单体积雨云降水。回波圆盘上显示的 120 km 半径范围内还有其他大大小小的回波区域在发展变化, 因此, 船舶在一天之内可能遇到多次降雨过程。



**Figure 10.** Doppler weather radar echo intensity (time 18:32, the red dot indicates the heading of the ship)

**图 10.** 多普勒天气雷达回波强度(时间 18:32, 红点指示的是船舶航向)



## 4. 总结

通过以上分析,可以得出以下几点结论:

一、两个航次测得的海上强度较大的降水主要发生在热带地区,热带辐合云系是造成高强度降水的主要天气系统之一,海上有降雨的天数约占 45.2%,其中以阵性降雨为主,约占降雨总天数的 65.9%。降雨时间段分布频率 16~19 时降雨次数较少,其余时间段相差不大,其中 04 时至 15 时的阵雨降水概率明显大于 16 时至 03 时。

二、在降雨期间会有明显的能见度下降,能见度下降时间和大小与降雨时间和强度并非简单的对应关系;大气湿度和海表皮温也会在降雨期间产生明显变化,其中海表皮温变化趋势与大气温度一致,但是变化的速度要慢,幅度要小;多普勒天气雷达回波强度可以比较直观地显示出雨区大小、方位和距离,有利于进行海上降雨的短临预报。

然而,本文的样本量还不够大,由于船舶航线的限制,对全球海洋的调查范围还远远不足,尤其是由于船舶会主动规避热带气旋和温带气旋等灾害性天气系统,该数据中不包括热带气旋和温带气旋等天气系统的情况。因此,本文的结论具有一定的局限性,需要后续获取更多更全面的样本数据进行分析。

## 参考文献

- [1] 林久人,祁建华,谢丹丹,孟祥斌. 海洋降水中无机离子浓度及湿沉降通量——中国海及西北太平洋降水的研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1706-1715.
- [2] 姜洪峰,郑崇伟,陈飞,等. 西北太平洋海洋气象观测及统计产品数据集[J]. 中国科学数据: 中英文网络版, 2021, 6(1): 146-153.
- [3] 郑崇伟,李崇银. 海洋强国视野下的“海上丝绸之路”海洋新能源评估[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(2): 175-183.
- [4] 谭龙. 广西综合气象观测网发展历程回顾[J]. 气象研究与应用, 2020, 41(4): 94-99.
- [5] 匡昌武,张雪芬,黄斌,等. 南海海洋气象观测技术现状与发展[J]. 气象科技进展, 2020, 10(4): 151-152.
- [6] 安豪. 全球导航卫星信号极化相移监测降雨强度技术研究[D]. [博士学位论文]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
- [7] 王乃敏. 测量海面降水的新仪器——光闪烁雨量计[J]. 气象水文海洋仪器, 1994(4): 23-37.
- [8] 李磊,吴振森,林乐科,等. 海上对流层微波超视距传播与海洋大气环境特性相关性研究[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(1): 209-210.
- [9] 刘贞文,文洪涛,牛富强,等. 海上降雨的水下噪声功率谱特征分析[J]. 应用海洋学学报, 2013, 32(4): 509-516.
- [10] 王力杰,李晖,程杰,张弛,宋选安. 毫米波大规模 MIMO 技术与海上雨衰模型综述[J]. 电讯技术, 2020, 60(7): 856-864.
- [11] 张建飞,丁广,杨建东,等. 海上云层和降水对车载高频段卫星通信的影响[J]. 电子学报, 2018, 46(2): 381-386.
- [12] 弗雷德里克·K·鲁特默斯,爱德华·J·塔巴克. 气象学与生活[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016: 101.
- [13] 许小峰. 中国新一代多普勒天气雷达网的建设与技术应用[J]. 中国工程科学, 2003, 5(6): 7-14.