

2012~2016年太平洋上空“千足虫状”云的特征分析

张馨予¹, 王忠石¹, 傅刚^{1,2,3}, 李鹏远¹, 马絮因¹, 张祎彤¹, 杨梦丽¹, 巫慧莹¹

¹中国海洋大学海洋与大气学院海洋气象学系, 山东 青岛

²中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛

³青岛海洋科技中心, 海洋动力过程与气候功能实验室, 山东 青岛

收稿日期: 2024年6月4日; 录用日期: 2024年7月8日; 发布日期: 2024年7月15日

摘要

本文利用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的可见光卫星云图、美国国家航空航天局(NASA)提供的中分辨率成像光谱仪(MODIS)卫星图像和MODIS Level-2级数据产品、以及欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的ERA5再分析资料, 对2012年至2016年发生在太平洋上空的“千足虫状”云进行统计分析, 共发现183个“千足虫状”云个例发生在中低纬度的东南太平洋和东北太平洋上空, 其中北半球有19个, 南半球有164个。还对2012年8月22日的一个“千足虫状”云典型个例的云顶高度、云顶气温和云顶气压等特征进行了分析, 发现云顶气压在800 hPa~850 hPa之间, 云顶高度约为1 km~2 km, 云顶附近有大气逆温层。

关键词

“千足虫状”云, 统计分析, 垂直结构, 大气逆温层

Characteristics of the “Millipede Clouds” over the Pacific Ocean from 2012 to 2016

Xinyu Zhang¹, Zhongshi Wang¹, Gang Fu^{1,2,3}, Pengyuan Li¹, Xuyin Ma¹, Yitong Zhang¹, Mengli Yang¹, Huiying Wu¹

¹Department of Marine Meteorology, College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong

²Key Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao Shandong

³Laboratory for Ocean Dynamics and Climate, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao Shandong

Received: Jun. 4th, 2024; accepted: Jul. 8th, 2024; published: Jul. 15th, 2024

文章引用: 张馨予, 王忠石, 傅刚, 李鹏远, 马絮因, 张祎彤, 杨梦丽, 巫慧莹. 2012~2016年太平洋上空“千足虫状”云的特征分析[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(4): 876-888. DOI: 10.12677/ccrl.2024.134100

Abstract

This paper investigates the fundamental features of “Millipede Clouds” which occurred over the Pacific Ocean from 2012 to 2016 by using the visible satellite imagery provided by National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) satellite imagery and MODIS Level-2 data products provided by National Aeronautics and Space Administration (NASA), and the fifth generation ERA5 reanalysis data provided by the European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF). Total of 183 “Millipede Clouds” were found to occur over the low-latitude region of the Southeastern Pacific Ocean and the Northeastern Pacific Ocean. Among of them, 19 occurred over the Northern Hemisphere, and 164 occurred over the Southern Hemisphere, respectively. We also selected a typical “Millipede Cloud” on 22 August 2012 to analyze its cloud top height, cloud top temperature, and cloud top pressure. The cloud top pressure ranged from 800 hPa to 850 hPa, the cloud top height was approximately 1 km~2 km, and an atmospheric inversion layer existed near the cloud top.

Keywords

“Millipede Cloud”, Statistical Analysis, Vertical Structure, Atmospheric Inversion Layer

Copyright © 2024 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

地球上的云覆盖了约三分之二的地球表面积，是天气和气候变化中最活跃、最复杂的因素之一，人类最早获得的气象知识也源于对云等天气现象的直接观测。海洋面积约占地球表面积的 71%，对于全球气候变化有重要影响。相对于对陆地上空云的认识，人类对海洋上空云的认识更显肤浅和不足，主要原因是缺乏对海洋上空云的观测。

伴随卫星和遥感技术的飞速发展，人类可以利用气象卫星观测海洋上空大气的运动，对海洋上空的云有了更为深入的认识。1962 年，TIROS (Television Infrared Observation Satellite) V 号卫星拍摄到了夏威夷岛附近存在一种特殊结构的云系，形状如古代车轮，有多条清晰的“云臂”从中心向四周延伸，故被称为“射线状”云(Actiniform Cloud)。国际气象界著名学术刊物《每月天气评论》(Monthly Weather Review) 在 1963 年第 1 期的 Picture of the Month 专栏里[1]，把这张云图作为该刊第一张展示的卫星云图。2022 年，Schultz and Potter [2]在纪念 Monthly Weather Review 创刊 150 周年的回顾性文章《每月天气评论的 150 周年：历史、影响和遗产》(Monthly Weather Review at 150 Years: Its History, Impact, and Legacy)一文中再次提及该云图。由此可见 1962 年发现的“射线状”云在人类认识海洋上空各种大气现象的历史进程中具有的重要意义。

Bugaev [3]的研究表明，在亚热带海洋上空不仅有“射线状”云系，而且还有形状类似“蜈蚣”的云系，后来这种云系被 Fu *et al.* [4]称为“千足虫状”(Millipede Cloud)的云系。这种云最早出现在 1972 年 7 月 30 日 17:00 UTC 的 Meteor 11 号卫星在南美洲西海岸处拍摄到卫星云图中(图 1(a))，被 Bugaev 称为“蜈蚣状”(scolopendra)云[3]。该云有一条明显的“中轴线”以及从“中轴线”向两侧延伸的清晰的云臂，状如“蜈蚣”。但半个多世纪以来，对这类云的研究寥寥无几，直至 2023 年，Fu *et al.* [4]才开始了这类

云的系统研究,他们根据卫星云图上云的形态特征,将其命名为“千足虫状”云(Millipede Cloud),并首次给出了这种云的定义¹:“千足虫状”云是一类长条形结构的浅层海洋对流云,云体中心有一条明显的“中轴线”,长度从数百千米延伸至数千千米,“中轴线”两侧有大量清晰的、组织良好的“径向云臂”(radial cloud arms),延伸数十千米,看起来像是“千足虫”的腿。Fu *et al.* [4]利用MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)卫星云图,发现2017年在东太平洋(170°W~60°W)上空共发生了59个“千足虫状”云。图1(b)为Terra卫星于2017年9月3日17:30 UTC拍摄的一个“千足虫状”云个例。该研究小组的研究指出,“千足虫状”云在世界其他各大洋上空、几乎所有海洋层云或层积云常见的地区都有发生,表明其并不罕见。因此研究“千足虫状”云的时空分布、形态结构具有十分重要的科学价值。

本文重点研究2012年至2016年共五年间发生在太平洋上空“千足虫状”云的基本特征,分析其时空分布特征以及水平和垂直结构,并分析2012年8月22日“千足虫状”云一个典型个例,为今后深入研究其形成机制奠定基础。

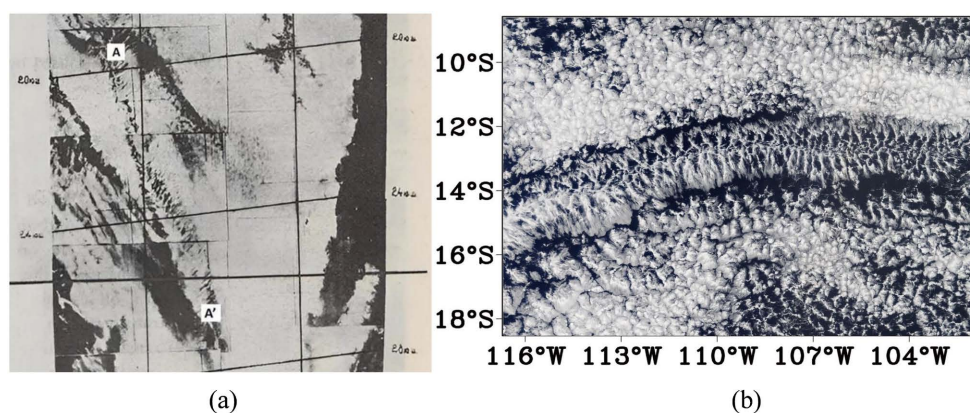


Figure 1. (a) An image of a “scolopendra” cloud at 17:00 UTC 30 July 1972 taken by Meteor 11 satellite [as indicated by AA’ line, cited from the Figure 13 of Bugaev (1973) [3] at page 405]. (b) Terra satellite visible image at 17:30 UTC 03 September 2017, cited from the Figure 1(d) of Fu *et al.* (2023)

图 1. (a) Meteor 11 号卫星于 1972 年 7 月 30 日 17:00 UTC 拍摄到的形似“蜈蚣”(scolopendra)的云[如图中 AA’连线所示,引自 Bugaev (1973) [3] 论文第 405 页的图 13]。(b) Terra 卫星于 2017 年 9 月 3 日 17:30 UTC 拍摄的可见光云图,引自 Fu *et al.* (2023) 论文图 1(d)

2. 资料和方法

2.1. 资料

本文中使用了以下资料:

(a) 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, 简称 NASA)的 Aqua 卫星和 Terra 卫星上搭载的中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, 简称 MODIS)真彩色可见光卫星云图。这些云图来自 MODIS Level-1B 级资料,可在 Worldview 和全球图像浏览服务(Global Imagery Browse Services, 简称 GIBS)中进行可视化。MODIS 是第一个在地球轨道上以相对高的空间分辨率(250 m)提供宽范围(2,330 km)图像的成像传感器,原始资料来自 MODIS Level-1A 原始辐射扫描,传感器分辨率为 500 m 和 250 m,时间间隔为 1 d。

(b) 美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, 简称 NOAA)的第

¹英文定义是: (a) They have long and meandering “central axis” extending from several hundreds to thousands kilometers. (b) There are a great number of well-organized “radial cloud arms” in two sides of the “central axis” extending several tens of kilometers, those look like “Millipede Legs”。

三代实用气象观测卫星 NOAA-20 以及 NASA 的 Suomi NPP (Suomi National Polar-orbiting Partnership) 卫星携带的可见光红外成像辐射仪(Visible Infrared Imaging Radiometer Suite, 简称 VIIRS)提供的可见光卫星云图。这些云图同样可以在 Worldview 和全球图像浏览服务(GIBS)中可视化, 传感器分辨率为 750 m 和 375 m, 时间分辨率 1 d, 下载地址为: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>。

(c) 云顶信息和云微物理信息来自 NASA 提供的 MODIS Level-2 级数据产品。MODIS 云产品结合红外发射和太阳反射辐射技术来确定云的物理特性和辐射特性, 云顶高度、云顶温度和云顶有效发射率的结果通过红外检索方法在白天和夜间以 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 或 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的分辨率生成。本研究所使用的云顶信息包括云顶高度、云顶气压、云顶温度等。这些数据均可从 MODIS 提供的 MOD06 (Terra 卫星)和 MYD06 (Aqua 卫星)上获取, 传感器分辨率为 5 km, 图像分辨率为 2 km, 时间分辨率为 1 d。

(d) 本文使用的气象分析资料来自欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 简称 ECMWF)提供的第五代 ERA5 再分析资料, 全球范围, 时间间隔为 1 h, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。本文使用了海平面气压、海表面温度、10-m 高度上的 u , v 风、2-m 高度上的温度, 还有不同气压层上的温度、位势高度、比湿、散度、垂直运动速度等物理量。地球表面单层资料的下载地址为: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>。高空资料的下载地址为: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=form>。

2.2. 方法

(a) 时间插值方法

由于“千足虫状”云发生的时间未必是整点时刻, 故采用拉格朗日(Lagrange)多项式插值法来获取其发生时刻的物理量。本文采用五阶拉格朗日插值多项式法, 即选取个例发生前后各 3 h 的 ERA5 再分析资料进行插值, 插值系数的计算公式如下:

$$l_i(x) = \frac{(x-x_0)(x-x_1)\cdots(x-x_{i-1})(x-x_{i+1})\cdots(x-x_n)}{(x_i-x_0)(x_i-x_1)\cdots(x_i-x_{i-1})(x_i-x_{i+1})\cdots(x_i-x_n)} \quad (1)$$

$$Y(x) = \sum_{i=0}^n y_i l_i(x) \quad (2)$$

公式(1)中 x_i 表示第 i 个整点时刻, x 表示“射线状”云个例发生的非整点时刻, 公式(2)为物理量的计算公式, y_i 表示第 i 时刻物理量的值, 取 $n = 5$ 。

(b) 云个例识别

由于“千足虫状”云常发生于浓密的层积云中, 与大片的“闭口细胞状”云(Closed Cellular Cloud)和“开口细胞状”云(Open Cellular Cloud)伴随发生[5] [6], 搜寻方式须依据云的组织结构、外观形态以及周围环境进行判断, 目前还难以找到一种客观方法来进行识别, 只能采用人工识别方法, 即从 NASA 提供的极轨卫星云图中, 识别出具备以下特征的云系: (1) 云系中心有一条明显的“中轴线”, 长度在几百千米至几千千米; (2) 有多条轮廓清晰的、长度为几十千米的径向云臂, 由“中轴线”向两侧延伸, 形似“千足虫”的腿。由于“千足虫状”云的生命周期往往在一天以上, 因此, 可以看到一个“千足虫状”云个例至少会在极轨卫星拼接云图中出现一次。另外, 在统计时, 若观察到连续两天及以上的卫星云图中“千足虫状”云个例位置不动, 则将其统计为一个个例。

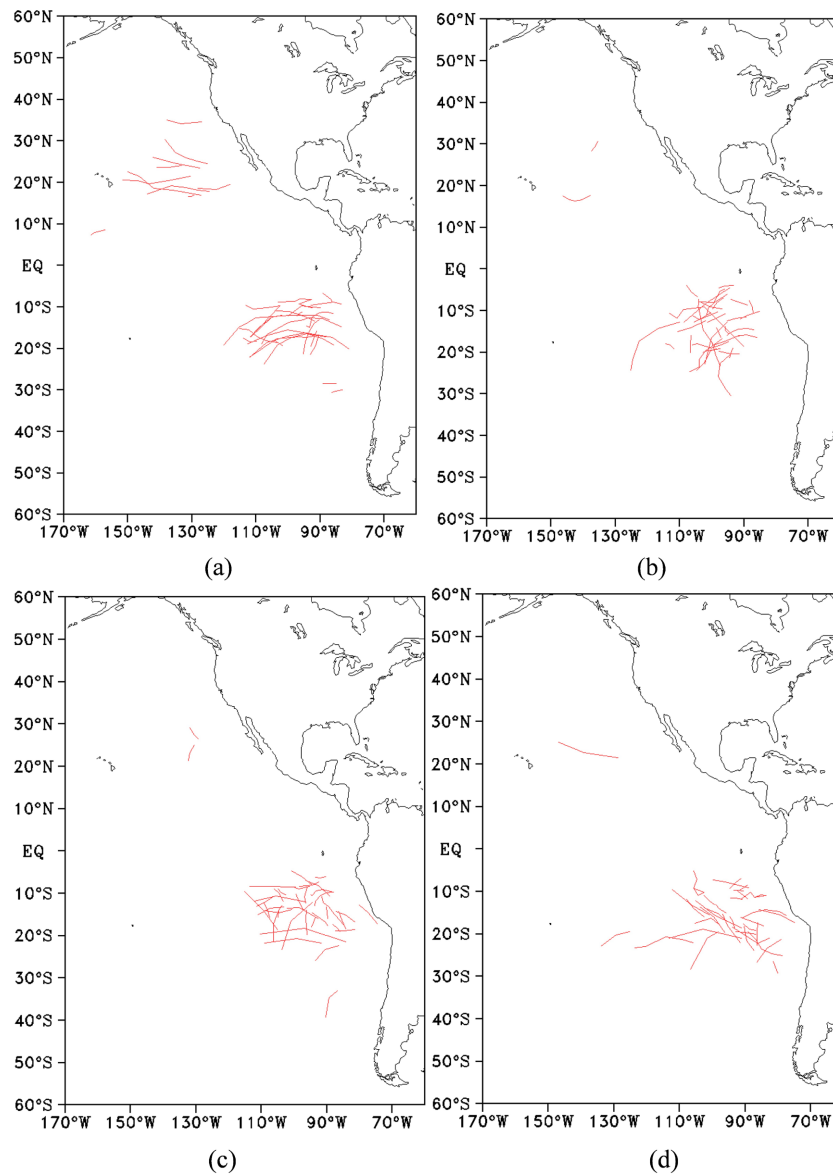
3. “千足虫状”云的基本特征

3.1. 空间分布特征

统计分析发现, 2012 年至 2016 年共有 183 个“千足虫状”云个例发生在中低纬度的东南太平洋和

东北太平洋上空,其中北半球有 19 个,南半球有 164 个。“千足虫状”云的空间分布具有明显的区域性特征,绝大多数的“千足虫状”云发生在低纬度的热带和副热带海域上空(见图 2)。进一步分析发现,北太平洋上空大多数“千足虫状”云发生在 20°N 附近;南太平洋上空“千足虫状”云具有大致相同的分布特征,大多发生在 0°~30°S 之间。从东西方向看,北太平洋上空的“千足虫状”云个个均分布在大陆以西 170°W~110°W 范围内,而南太平洋上空“千足虫状”云则集中分布在大陆西岸 120°W~80°W 的范围内。总体看来,南北半球“千足虫状”云发生位置的空间分布有较大差异,北半球的“千足虫状”云分布较为离散;南半球分布较为密集且不均匀,低纬地区“千足虫状”云发生的频率较高,东南太平洋、秘鲁西部海域为“千足虫状”云多发的海域。

此外,基于“千足虫状”云的独特形态,云的长轴的延伸方向同样值得研究。由 2012 年至 2016 年“千足虫状”云在太平洋上空的地理位置分布图可以看出,云的长轴方向大致呈东西走向,即与纬度方向平行,长轴较长、云体较长个例的长轴有一定程度的弯曲,长轴南北向发展的个例数相对较少。



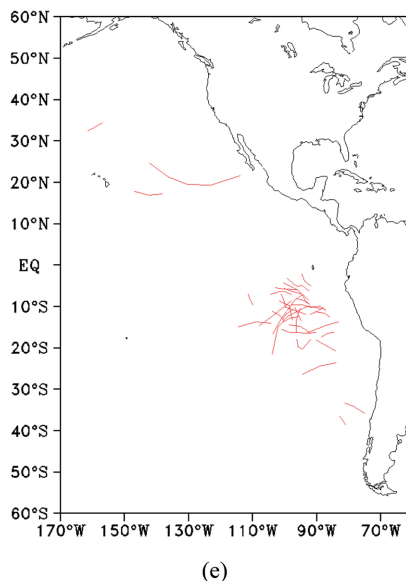


Figure 2. Geographic distribution of Millipede Clouds over the Pacific Ocean from 2012 to 2016. (a) 2012, (b) 2013, (c) 2014, (d) 2015, (e) 2016. The red solid lines indicate the geographic locations of long axis (the central axis) of Millipede Clouds

图 2. 2012 年至 2016 年, 太平洋上空“千足虫状”云的地理位置分布图。(a) 2012 年, (b) 2013 年, (c) 2014 年, (d) 2015 年, (e) 2016 年, 红色实线表示“千足虫状”云系长轴(中心轴线)的位置

3.2. 逐月发生个数分布

2012 年至 2016 年“千足虫状”云的逐月发生个数分布如图 3 所示。“千足虫状”云发生个数可分为三个时段, 高频发生月份(6、7、8 月), 中频发生月份(5、9、10 月), 低频发生月份(1、2、3、4、11、12 月)。183 个“千足虫状”云个例中, 在高频发生月份(6、7、8 月)有 131 个, 约占总数的 72%, 其中最多的是 7 月份, 共 48 个。在中频发生月份(5、9、10 月)有 37 个, 约占总数的 20%。在低频发生月份(1、2、3、4、11、12 月)有 15 个, 约占总数的 8%。各月均有“千足虫状”云发生, 表明“千足虫状”云是全年均可发生的现象。

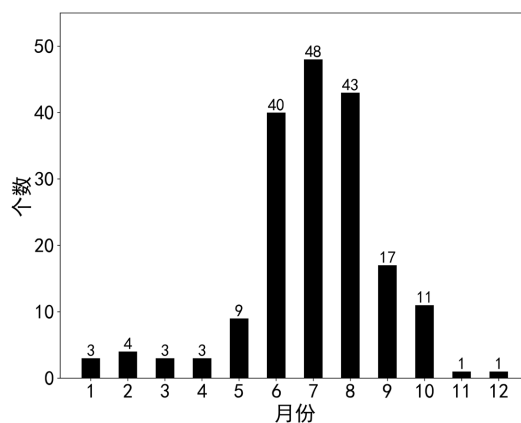


Figure 3. Monthly distribution for occurrence number of Millipede Clouds over the Pacific ocean from 2012 to 2016. The horizontal axis denotes the month. The number in vertical axis denotes the occurrence number of Millipede Clouds in that month

图 3. 2012 年至 2016 年太平洋上空“千足虫状”云逐月发生个数分布图, 横轴表示月份, 纵轴所标数值表示该月“千足虫状”云发生的个数

“千足虫状”云在不同季节的发生频率变化较大。考虑到南北半球“千足虫状”云有所差异，本文分别统计了南半球和北半球“千足虫状”云的月份分布情况，逐月发生个数分布情况见图4以及表1。4月至10月、12月当中南太平洋上空发生个数多于北太平洋，且6、7、8月相差最大，最大差距可达46个(7月份)，这时对应南半球冷季。在1、2、3、11月当中，北半球发生的“千足虫状”云个数要多于南半球，这时对应北半球的冷季。由此可推论，冷季可能更有利于“千足虫状”云的发生。

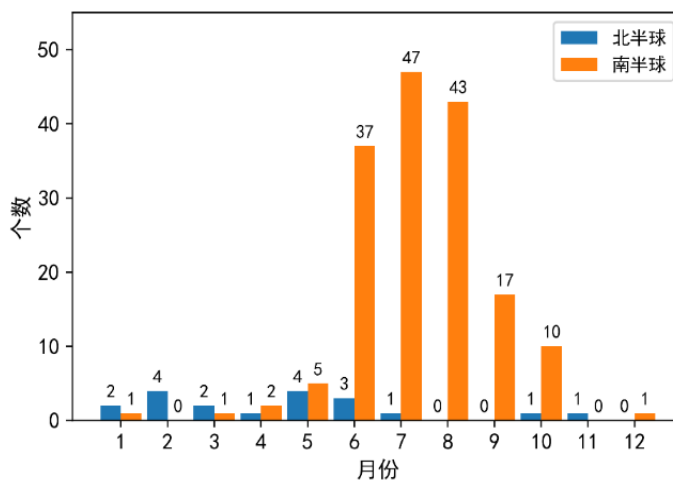


Figure 4. Monthly distribution for occurrence number of Millipede Clouds over the Pacific Ocean at Northern and Southern Hemispheres from January 2012 to December 2016

图 4. 2012 年 1 月至 2016 年 12 月在太平洋上空的“千足虫状”云个例在南北半球逐月发生个数分布图

Table 1. Monthly distribution for occurrence number of all Millipede Clouds over the Southern and Northern Hemispheres from 2012 to 2016

表 1. 2012 年至 2016 年南北半球“千足虫状”云发生个数的逐月分布统计表

月份	南半球/个	北半球/个	总计/个
一月(January)	1	2	3
二月(February)	0	4	4
三月(March)	1	2	3
四月(April)	2	1	3
五月(May)	5	4	9
六月(June)	37	3	40
七月(July)	47	1	48
八月(August)	43	0	43
九月(September)	17	0	17
十月(October)	10	1	11
十一月(November)	0	1	1
十二月(December)	1	0	1
全年(Total Year)	164	19	183

4. 2012 年 8 月 22 日“千足虫状”云典型个例分析

4.1. 个例基本信息

图5展示了2012年8月22日20:05 UTC发生在南太平洋上空的一个典型“千足虫状”云个例的卫

星云图和云顶高度、云顶气温和云顶气压等特征，云系中心位于(15.7657°S, 97.8674°W)附近，云系面积约为 795642 km²，长轴长度约为 2447 km。其南北两侧均与大面积的“开口细胞状”云相连接，东西两侧“千足虫状”的形态并不显著，“中轴线”清晰可辨，从“中轴线”出发的云臂之间无云区明显，并随着云臂延伸，外端逐渐发散并近似连成一个整体，云系整体组织结构清晰，可以认为是一个典型的“千足虫状”云个例。

该“千足虫状”云个例的云顶高度、云顶气温和云顶气压如图 5(b)、图 5(c)和图 5(d)所示。该个例的“中轴线”以及云臂处的云顶高度约为 1600 m~2400 m，云顶温度约为 280 K~285 K，云顶气压约为 800 hPa~850 hPa。该个例云顶高度分布相对均匀，“中轴线”南侧云高略高于北侧，且云顶高度与北侧“开口细胞状”云相差不大，云顶温度也呈现类似特征。

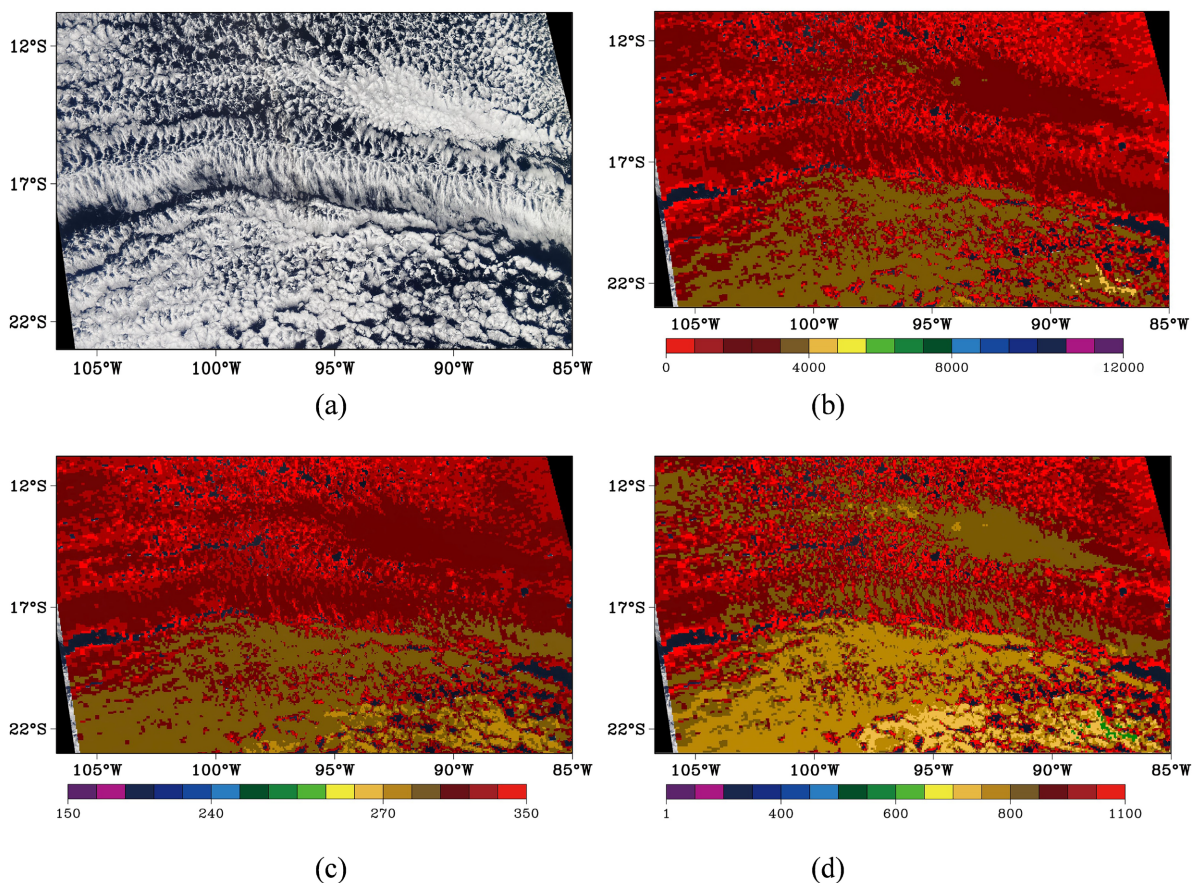


Figure 5. The cloud top information of “Millipede Cloud” at 20:05 UTC 22 August 2012. (a) Aqua satellite image, (b) Cloud top height (unit: m), (c) Cloud top temperature (unit: K), (d) Cloud top pressure (unit: hPa)

图 5. MODIS 传感器提供的 2012 年 8 月 22 日 20:05 UTC “千足虫状”云个例云顶信息，(a) Aqua 卫星云图，(b) 云顶高度(单位：m)，(c) 云顶温度(单位：K)，(d) 云顶气压(单位：hPa)

4.2. 垂直剖面分析

Fu *et al.* [4]分析指出，“千足虫状”云是一类低云，云顶气压一般在 800 hPa~850 hPa 之间。针对该个例，我们根据 2012 年 8 月 22 日 20:05 UTC 的 Aqua 卫星云图(图 6)中的 ABCD 剖面，利用 ERA5 再分析资料，先按照公式(1)和(2)进行时间插值，然后绘制了 2012 年 8 月 22 日 20:05 UTC 的垂直剖面图(见图 7)。

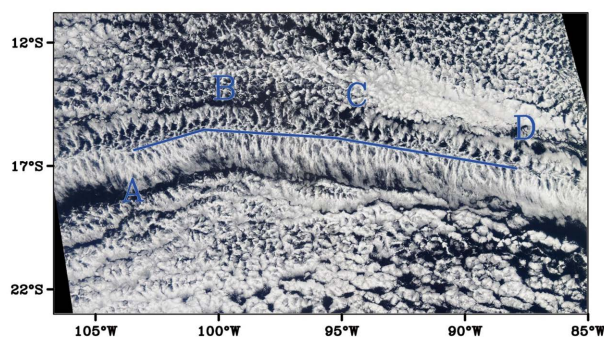
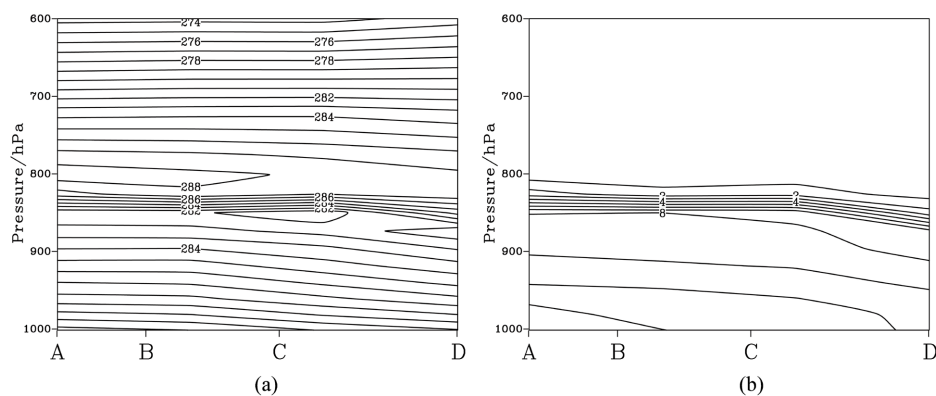


Figure 6. Aqua satellite image of “Millipede Cloud” at 20:05 UTC 22 August 2012. Line ABCD will be used for vertical analyses later

图 6. 2012 年 8 月 22 日 20:05 UTC “千足虫状”云个例的 Aqua 卫星云图，线段 ABCD 是用于后面垂直剖面分析的剖面

由气温垂直剖面可知，在 850 hPa 以下，等温线基本平行，气温的垂直分布符合对流层气温随高度升高而降低的特征。但在 800 hPa 至 850 hPa 之间等温线密集，表明“千足虫状”云在接近云顶附近区域温度垂直梯度较大。同时在该区域范围，气温随高度升高而升高，说明在接近云顶附近存在明显的逆温层。而在 800 hPa 以上和 850 hPa 以下，气温随高度升高而降低(图 7(a))。对于“千足虫状”云而言，云顶附近的逆温层可使得上下层水汽交换变弱，下层大气水汽含量大，有利于“千足虫状”云形成；但对于上层大气，逆温层会抑制对流的形成，不利于水汽的垂直输送，从而导致 800 hPa 以上的水汽含量较低，空气干燥。分析比湿垂直剖面可知，在 850 hPa 以下比湿较大，有利于云的形成。但 850 hPa 至 800 hPa 之间比湿急剧减小，表明在接近云顶附近区域，垂直方向水汽的分布差异很大。800 hPa 以上比湿很小，空气干燥，近乎无云形成(图 7(b))。水平散度垂直剖面中，950 hPa 以下散度为负值，表明近地面空气辐合。850 hPa 至 900 hPa 之间散度为正值，表明在“千足虫状”云中层内部空气辐散。在 800 hPa 至 850 hPa 之间，散度较小，表明水平运动较弱，可能受到逆温层的影响。空气低层辐合，高层辐散，由此推测在“千足虫状”云发生区域，空气主要以上升运动为主(图 7(c))。垂直运动速度剖面反映了垂直运动速度多都为正值，表明在“千足虫状”云发生区域，空气以上升运动为主。在 900 hPa 层上，垂直运动速度有正值中心，表明该层空气有较强的上升运动。在 800 hPa 至 900 hPa 之间，随着高度抬升，垂直运动速度有所减小，上升运动有所减弱。在 800 hPa 层上，垂直运动速度非常接近于零，说明受到逆温层的影响，大气垂直运动微弱(图 7(d))。综合分析图 7(c)、图 7(d)可知，“千足虫状”云内部的特征为：近地面至云系低层有辐合上升运动；云系中层以上为上升运动，水平运动较弱；云顶处由于受到逆温层的影响，大气垂直运动微弱，水汽无法继续进行垂直输送，从而阻碍了云系的向上发展。



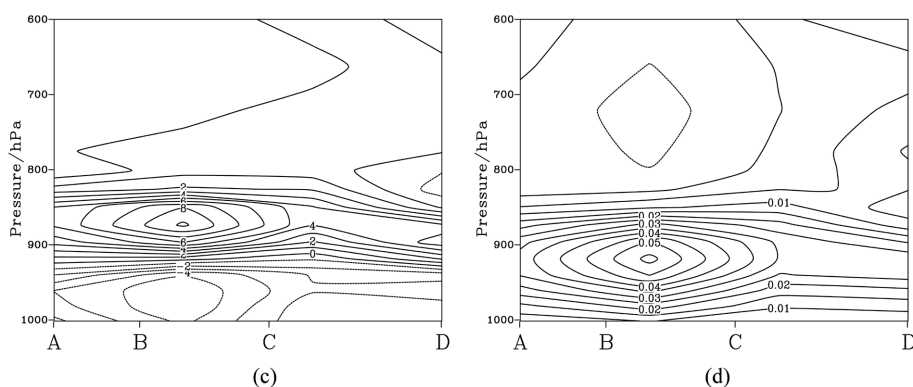


Figure 7. Vertical profiles of a “Millipede Cloud” which occurred over the Southern Pacific Ocean at 20:05 UTC 22 August 2012. (a) Air temperature profile (unit: K), (b) Specific humidity profile (unit: g/kg), (c) Horizontal divergence profile (unit: $10^{-5}/s$), (d) Vertical speed profile (unit: m/s)

图 7. 2012 年 8 月 22 日 20:05 UTC 南太平洋上空“千足虫状”云个例的垂直剖面图。(a) 气温垂直剖面(单位: K), (b) 比湿垂直剖面(单位: g/kg), (c) 水平散度垂直剖面(单位: $10^{-5}/s$), (d) 垂直运动速度剖面(单位: m/s)

4.3. 气象要素分析

为分析该个例环境背景气象要素特征, 本文选取了 925 hPa、875 hPa、825 hPa 和 700 hPa 四个气压层, 分析各层的位势高度、气温、水平风场、比湿分布特征。

由图 8 可知, 该“千足虫状”云发生区域整体受到高压系统的控制, 海平面高压中心位于(35°N, 100°W)附近, 中心气压约为 1032.0 hPa, 高压中心西南侧存在一个小低压中心, 高低压中心之间等压线密集, 气压梯度大, 风速较大。“千足虫状”云发生区域位于海平面高压中心的偏北侧, 其走向与等压线近似平行, 该区域内海平面风向为东南风, 冷平流贯穿整个“千足虫状”云发生区域, 由云区右侧至左侧, 2 m 高度风场方向逐渐偏转, 与“千足虫状”云长轴方向趋于一致。受高压系统的影响, 该区域整体风速较小, 有利于云状的维持。

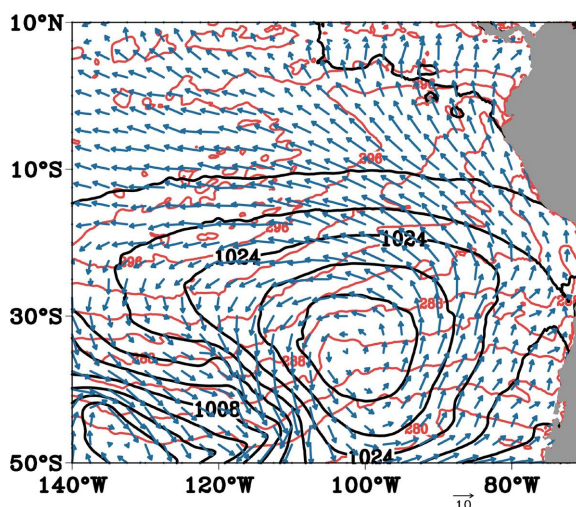


Figure 8. Characteristics of surface meteorological variables for Millipede Cloud occurred over the Southern Pacific Ocean at 20:05 UTC 22 August 2012. The black line represents the sea level pressure (unit: hPa). The red line represents the sea surface temperature (unit: K). The blue arrow denotes the 2-m height wind field

图 8. 2012 年 8 月 22 日 20:05 UTC 海表面气象要素特征, 黑色实线表征海平面气压(单位 hPa), 红色实线表征海表面温度(单位: K), 蓝色箭头表征 2 m 高度的风场

分析各层的位势高度和气温特征(图 9)。925 hPa 层上的位势高度场形势与海平面气压场基本相似, 高压中心位置略向北偏移。875 hPa、825 hPa 层上的闭合等压线数量减少, 高压中心略微向西移动。700 hPa 层上高压中心已不存在闭合等压线, 高压中心向西北方向偏移, 低压中心位置随高度增加未发生明显偏移。总体来看, 高压系统较为深厚, 云体更容易维持。

分析区域(50°S~10°N, 140°W~80°W)温度分布特征, 来判断“千足虫状”云发生区域的温度背景场特征。在 925 hPa 层上, 温度形势与海平面类似, 西北侧小范围闭合等温线增多(图 9(a))。在 875 hPa 层上, 闭合等温线进一步增多, 等温线更加密集, 整体温度梯度增大(图 9(b))。在 825 hPa 层上, 等温线分布明显更为密集且较为破碎, 在云体发生区域附近存在较大的温度梯度(图 9(c))。在 700 hPa 层上, 温度梯度减小, 等温线变得光滑且与槽脊线走向类似, 表明该“千足虫状”云个例并未发展到 700 hPa 的高度(图 9(d))。同时, 随着高度升高, 槽脊逐渐发展, 北抬脊加强, 南伸槽加深, 导致南部的冷空气向北侵入与暖空气汇合, 形成较大的温度梯度, 等温线密集, 导致该区域东侧温度异常, 进而促进了云的扰动与发展。

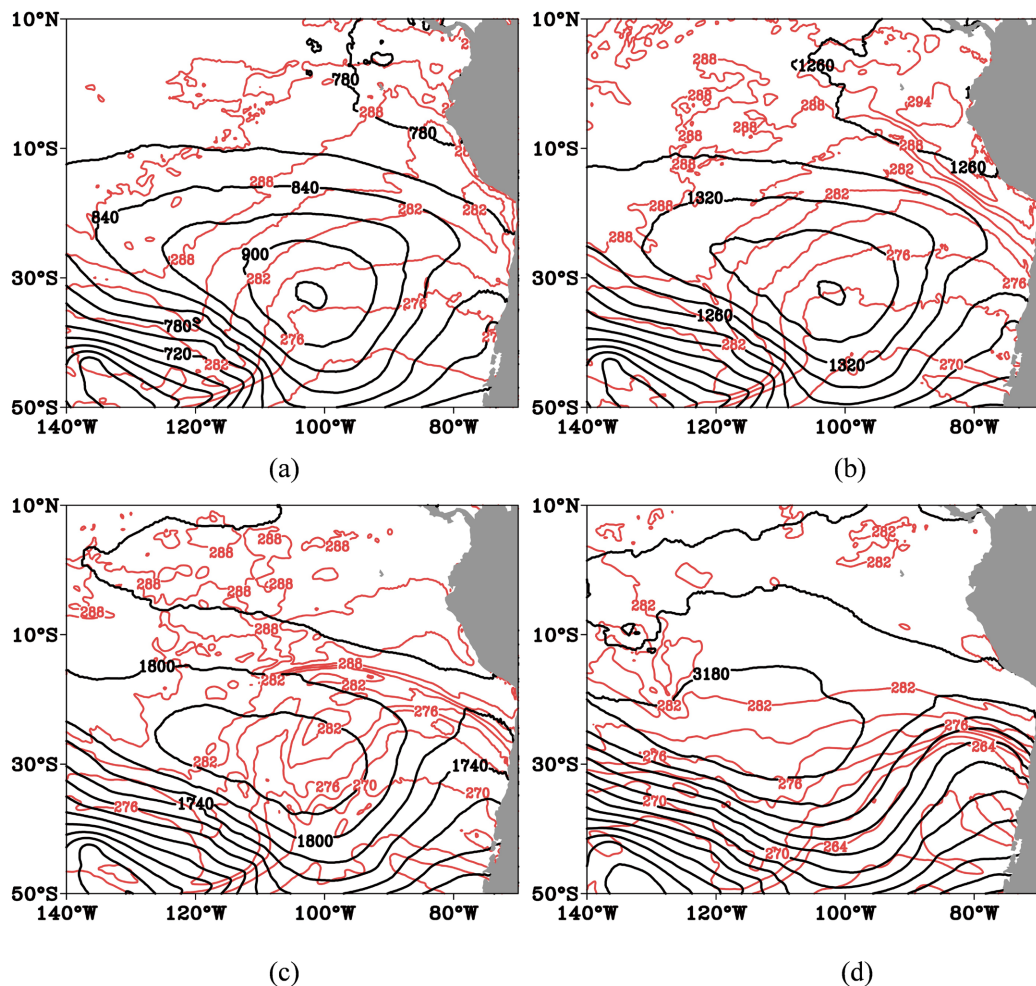


Figure 9. Background characteristics of Millipede Cloud occurred over the Pacific Ocean at 20:05 UTC 22 August 2012. The black line denotes geopotential height (unit: gpm). The red line denotes air temperature (unit: K). (a) 925 hPa, (b) 875 hPa, (c) 825 hPa, (d) 700 hPa

图 9. 2012 年 8 月 22 日 20:05 UTC 太平洋上空“千足虫状”云个例环境背景气象要素特征, 黑色实线表征位势高度(单位: gpm), 红色实线表征气温(单位: K), (a) 925 hPa, (b) 875 hPa, (c) 825 hPa, (d) 700 hPa

图 10 为该“千足虫状”云个例不同气压层上的比湿场和温度场分布。在 925 hPa 层上(图 10(a)), 比湿场整体分布呈现出西北高、东南低, 由西北向东南递减的特征, “千足虫状”云个例发生区域附近水汽充足, 有利于云的形成。在云体发生区域, 等温线、等比湿线都明显向右侧弯曲, 表明云的发生区域内温度、比湿明显大于周围区域。在 875 hPa 层上(图 10(b)), 闭合等比湿线减少, 比湿梯度减小, 温度梯度有所增加。在 825 hPa 层上(图 10(c)), 个例发生区域出现了较大的温度梯度, 且温度相较于 875 hPa 层有所升高, 比湿下降较快。气温和比湿的垂直剖面图(图 7(a)、图 7(b))显示, 逆温层可以发展到 850 hPa 及以上的高度, 且此处温度梯度, 比湿梯度都较大。可以判断该区域(23°S~10°S, 107°W~85°W)被干暖气团覆盖, 温度相较于 875 hPa 层有所升高, 说明该区域已被逆温层覆盖, 逆温层中的干暖空气与云带中的暖湿空气形成鲜明的对比。在 700 hPa 层上(图 10(d)), 整体比湿大幅降低, 等温线、等比湿线都非常稀疏, 可见该“千足虫状”云个例未发生至此高度。

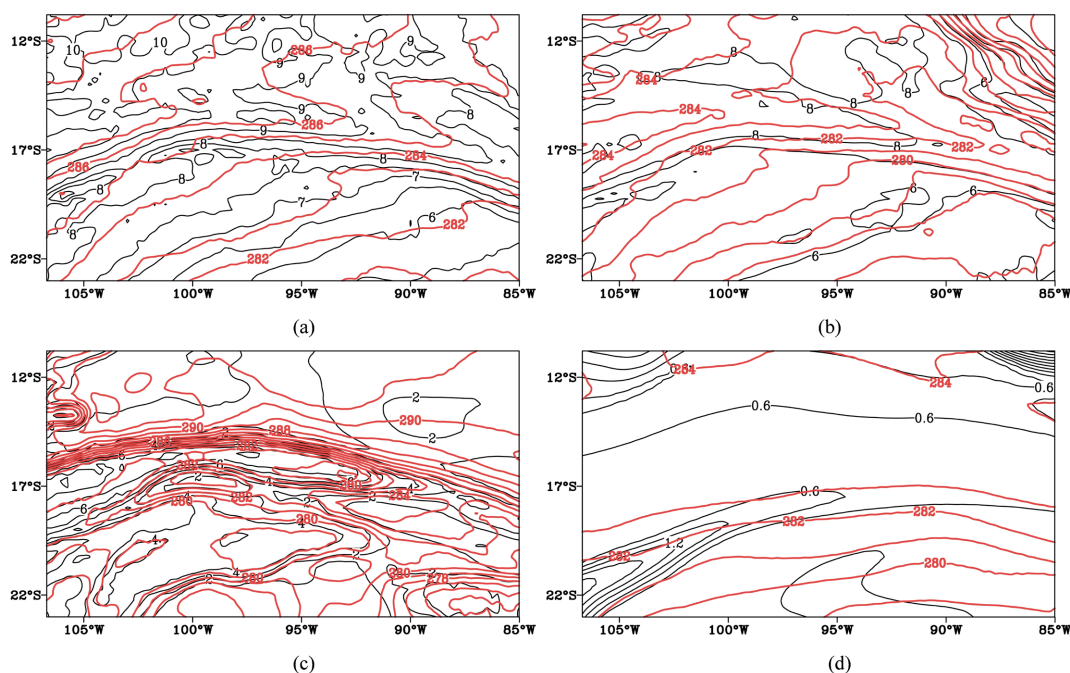


Figure 10. Geographical distribution of various meteorological variables at different pressure levels for “Millipede Cloud” at 20:05 UTC 22 August 2012. The red line represents air temperature (unit: K). Black line represents specific humidity (unit: g/kg). (a) 925 hPa, (b) 875 hPa, (c) 825 hPa, (d) 700 hPa

图 10. 2012 年 8 月 22 日 20:05 UTC “千足虫状”云个例不同气压层上的气象要素分布, 红色实线表征气温(单位: K), 黑色实线表征比湿(单位: g/kg), (a) 925 hPa, (b) 875 hPa, (c) 825 hPa, (d) 700 hPa

5. 总结

本文利用 NASA 提供的 Aqua 卫星和 Terra 卫星搭载的 MODIS 可见光卫星云图, 对 2012 年至 2016 年五年间发生在太平洋上空的“千足虫状”云的时空分布特征进行了分析, 共发现 183 个“千足虫状”云个例, 其中南半球 164 个, 北半球 19 个。

本文得到的主要结论如下:

(1) “千足虫状”云的空间分布具有明显的区域特征, 五年间绝大多数“千足虫状”云发生在低纬度的热带和副热带海域上空, 低纬地区“千足虫状”云发生的频率较高, 东南太平洋、秘鲁西部海岸为“千足虫状”云多发的区域。

(2) 各月份均有“千足虫状”云的发生, 6、7、8月是高频发生月份, 5、9、10月是中频发生月份, 1、2、3、4、11、12月是低频发生月份。冷季更有利于“千足虫状”云的发生。

基于 ERA5 客观再分析数据和 NASA 提供的 MODIS Level-2 级数据产品对 2012 年 8 月 22 日“千足虫状”云个例的垂直剖面特征和气象要素特征的分析表明:

(3) “千足虫状”云在接近云顶附近区域有明显的逆温层, 逆温层的存在抑制对流的生成, 不利于上下层水汽交换。850 hPa 以下比湿较大, 有利于“千足虫状”云的生成, 850 hPa 至 800 hPa 即接近云顶的区域比湿急剧减小, 800 hPa 以上比湿减小, 空气干燥, 不利于“千足虫状”云的生成。

(4) “千足虫状”云内部的运动特征为近地面至云系底层存在辐合上升运动; 云系中层以上上升运动为主, 水平运动较弱, 有利于水汽垂直输送; 云顶处由于受到逆温层的影响, 大气稳定, 垂直运动微弱, 水汽无法继续进行输送, 从而阻碍了云系的向上发展。

基金项目

本文得到中国海洋大学省级大学生创新创业训练 SRDP 项目(项目号: S202310423016)经费的支持, 傅刚和李鹏远得到国家重点研发计划“全球海洋气象灾害监测预报预警技术及示范应用”(2022YFC3004204)和国家自然科学基金面上项目(42275001)的资助。

参考文献

- [1] Singer, S.F. (1963) Picture of the Month. *Monthly Weather Review*, **91**, 2.
- [2] Schultz, D.M. and Potter, S. (2022) Monthly Weather Review at 150 Years: Its History, Impact, and Legacy. *Monthly Weather Review*, **150**, 3-57. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-21-0267.1>
- [3] Bugaev, V.A. (1973) Dynamic Climatology in the Light of Satellite Information. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **54**, 394-418. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-54.5.394>
- [4] Fu, G., Wang, Z.-S., Zhang, X.-Y., Sun, W.-K., Li, P.-Y. and Wang, R.-Y. (2023) First Observational Perspectives of “Millipede Clouds” over the Eastern Pacific Ocean. *Geophysical Research Letters*, **50**, e2023GL106265. <https://doi.org/10.1029/2023gl106265>
- [5] Agee, E.M. (1984) Observations from Space and Thermal Convection: A Historical Perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **65**, 938-949. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1984\)065<0938:ofsac>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1984)065<0938:ofsac>2.0.co;2)
- [6] Garay, M.J., Davies, R., Averill, C. and Westphal, J.A. (2004) Actiniform Clouds: Overlooked Examples of Cloud Self-Organization at the Mesoscale. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **85**, 1585-1594. <https://doi.org/10.1175/bams-85-10-1585>