

王茹茵,艾嘉本,陆长远,等.2012—2016年太平洋上空“射线状”云的特征分析[J].海洋气象学报,2025,45(2):62-75.
WANG Ruyin, AI Jiaben, LU Changyuan, et al. Characteristic analyses of “Actinoform Clouds” over the Pacific Ocean from 2012 to 2016[J]. Journal of Marine Meteorology, 2025, 45(2): 62-75. DOI:10.19513/j.cnki.hyqxb.20231211001. (in Chinese)

2012—2016年太平洋上空“射线状”云的特征分析

王茹茵¹,艾嘉本¹,陆长远¹,王政寓¹,陈浩涵¹,孙维康¹,傅刚^{1,2,3}

(1.中国海洋大学海洋与大气学院,山东 青岛 266100;2.中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室,山东 青岛 266100;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 266237)

摘要 利用美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的Aqua和Terra卫星可见光云图和地球静止环境卫星(Geostationary Operational Environmental Satellites, GOES)红外卫星云图、欧洲中期天气预报中心提供的ERA5再分析数据(时间间隔为1 h,水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$),对2012—2016年发生在太平洋上空439个“射线状”云的特征进行分析。结果表明,“射线状”云多呈近似圆形或椭圆形,有明显的云系中心和清晰的辐射状径向云臂,云臂通常自云系中心向四周发散,形状如古代车轮。统计分析指出,约85%的“射线状”云个例发生在南半球,其中绝大多数“射线状”云发生在东南太平洋的秘鲁沿岸。全年皆有“射线状”云发生,6、7、8月为“射线状”云高频发生月份,5、9、10月为中频发生月份,1、2、3、4、11、12月为低频发生月份。大气逆温层对“射线状”云有重要影响,云系内部以上升运动为主,部分“射线状”云个例呈旋转形态,上升与下沉运动会影响云系结构。

关键词 “射线状”云;太平洋上空;时空分布;统计分析;大气逆温层

中图分类号: P426.5+2 **文献标志码**: A **文章编号**: 2096-3599(2025)02-0062-14

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxb.20231211001

Characteristic analyses of “Actinoform Clouds” over the Pacific Ocean from 2012 to 2016

WANG Ruyin¹, AI Jiaben¹, LU Changyuan¹, WANG Zhengyu¹, CHEN Haohan¹,
SUN Weikang¹, FU Gang^{1,2,3}

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Physical Oceanography of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Laboratory for Ocean Dynamics and Climate, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China)

Abstract In this paper, the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data carried on Aqua and Terra satellites, GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) infrared satellite cloud imagery provided by NASA (National Aeronautics and Space Administration) and ERA5 (the fifth generation) global reanalysis data issued by ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) with hourly time interval and horizontal resolution of $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ are used to analyze the characteristics and geographical distribution of a total of 439 “Actinoform Clouds” over the Pacific Ocean from 2012 to 2016. The results show that most of the “Actinoform Clouds” exhibit nearly circular or

收稿日期:2023-12-11;修回日期:2024-02-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3004204);国家自然科学基金面上项目(42275001)

第一作者:王茹茵,157661221@qq.com。

通信作者:傅刚,fugang@ouc.edu.cn。

elliptical shapes, with an obvious center of cloud system and clear radical arms extending from the center to outside, which look like a wheel in ancient times. The statistical analysis indicates that about 85% of the “Actinoform Clouds” occur over the Southern Hemisphere, and most of them occur over the Southeast Pacific Ocean off the coast of Peru. “Actinoform Clouds” occur throughout the whole year. High frequency of such clouds is observed in June, July and August, medium frequency in May, September and October, and low frequency in January, February, March, April, November and December, respectively. The atmospheric inversion layer has important impact on the formation and dissipation of the “Actinoform Clouds”, and the interior of the cloud system is dominated by upward motion; some of the “Actinoform Clouds” exhibit rotation patterns; the upward and downward motions affect the structure of the cloud system.

Keywords “Actinoform Cloud”; Pacific Ocean; spatio-temporal distribution; statistical analysis; atmospheric inversion layer

0 引言

云是地球大气中最复杂的自然现象。1803年,英国气象学家 Howard^[1]把云分为3类:卷云、层云和积云。卷云是在高空形成的纤细状或弯曲状云系,具有纤维状结构,常呈白色,无暗影,有毛丝般的光泽。层云是指宽广的云系,云体通常均匀成层,呈灰色或灰白色,像雾但不接地,层云的云底离地面高度常在2 km以下。积云是指在铅直方向向上发展的云系,轮廓分明,顶部凸起,云底平坦,云块之间多不相连,其外型类似棉花或花椰菜。

随着人造卫星探测技术的不断进步,利用卫星探测云的优势逐渐显现。1960年4月1日,美国发射了人类第一颗气象卫星 TIROS-1。该卫星发回的云图显示,在海洋上空出现水平尺度为50~100 km的“浅六边形细胞云”^[2],这种细胞状云水平尺度较大,地面观测者无法察觉。基于 Orlanski^[3]定义的空间尺度,该细胞状对流云属于“中尺度”云系,也被称为中尺度细胞对流(Meso-scale Cellular Convection, MCC)^[4]。这类“细胞状”云除了被观测到有“开放”和“封闭”两种形态外,有研究^[4-5]还发现存在第三类与MCC相似的云的形态。1962年, TIROS V 卫星首次观测到一种“射线状”云(Actinoform Cloud),早期的气象学家^[6-8]认为这种具有一定自组织结构的云系的产生机制与MCC具有较高的相似性,该云系的卫星云图也成为1963年1月《每月天气评论》月际展示图片系列的首张照片。然而这类云比想象得更复杂,当时人们并没有立刻认识到其科学价值,“射线状”云一词也未被收录到气象学词汇表中。直到1990年代末,科学家们

仍认为它们仅是“封闭”形态和“开放”形态细胞状云间的一种过渡形态。利用美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的Terra卫星对秘鲁西海岸观测的MISR(Multi-angle Imaging Spectro Radiometer)的图像显示,这种“射线状”云几乎发生在海洋性层云或层积云常见的每个地区,特别是在大陆的西海岸,尤其是南美洲的秘鲁^[9]、非洲的纳米比亚、西澳大利亚和南加州等地的海岸附近。2004年, Garay等^[9]对“射线状”云进行了初步分析,认为“射线状”云并不是罕见现象,其产生和发展都与海洋环流有密切联系。然而, Garay等^[9]只对“射线状”云的地理分布和形态特征进行了简单讨论,并未分析“射线状”云系发展过程中海洋和大气环境物理量的分布特征。目前人类对“射线状”云结构及特征的认识非常浅,尚有很多疑问无法解答。

虽然“射线状”云的特殊形态引起了人们很大兴趣,但国内外学术界尚未进行深入和广泛的研究。王忠石等^[10]利用MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)可见光卫星云图、NOAA-20(National Oceanic and Atmospheric Administration-20)和Suomi NPP(Suomi National Polar-orbiting Partnership)可见光和红外卫星云图,对2017—2021年发生在太平洋上空的257个“射线状”云个例进行统计分析。孙维康等^[11]对2017—2021年发生在大西洋和印度洋上空的118个“射线状”云个例进行统计分析,并利用WRF(Weather Research and Forecasting)模式对2019年7月8日南大西洋上空的“射线状”云个例进行了数值模拟研究。

此文旨在研究太平洋上空“射线状”云的基本特

征,拟利用极轨卫星 Aqua 和 Terra 提供的云图,对 2012—2016 年发生在太平洋上空的“射线状”云个例的时空分布特征、典型云系的水平结构和垂直结构进行分析,并进一步分析“射线状”云在不同阶段的内部结构特征,为今后深入研究其形成机制打下基础。

1 资料和方法

1.1 资料

1.1.1 ERA5 再分析数据

欧洲中期天气预报中心提供的 ERA5 再分析数据(全球范围),时间间隔为 1 h,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,包括 2 m 高度的气温场、2 m 高度的露点温度场、海平面平均气压场、不同气压层上的位势高度场、风场、气温场、比湿场等物理量。

1.1.2 MODIS 可见光卫星云图

NASA 提供的搭载于 Aqua 卫星和 Terra 卫星上的中分辨率成像光谱仪 MODIS 获取的可见光卫星云图,其空间分辨率为 $0.25 \text{ km} \times 0.25 \text{ km}$ 。

1.2 方法

由于卫星观测到“射线状”云的时间未必是整点时刻,可利用拉格朗日多项式法插值整点时刻的 ERA5 再分析数据获取非整点时刻的物理量。采用五阶拉格朗日插值多项式法^[12],即选取个例发生前后各 3 h 的 ERA5 再分析数据进行插值,插值系数的计算公式如下。

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

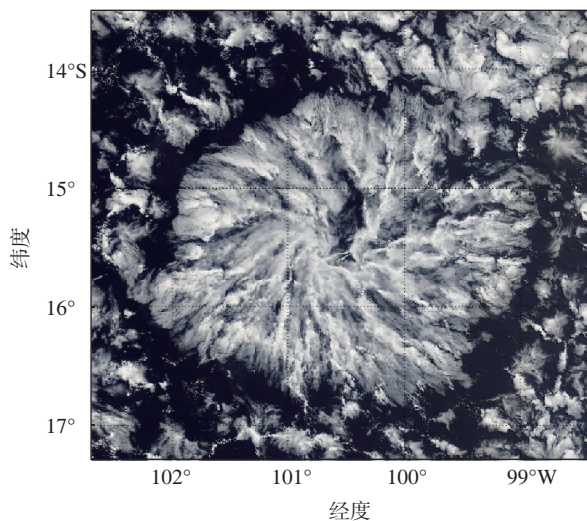
$$Y(x) = \sum_{i=0}^n y_i l_i(x) \quad (n=5) \quad (2)$$

式中: x_i 表示第 i 个整点时刻, x 表示卫星观测到“射线状”云个例的非整点时刻;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, $l_i(x)$ 表示插值基函数,代表各时刻物理量的权重, $Y(x)$ 表示插值结果。

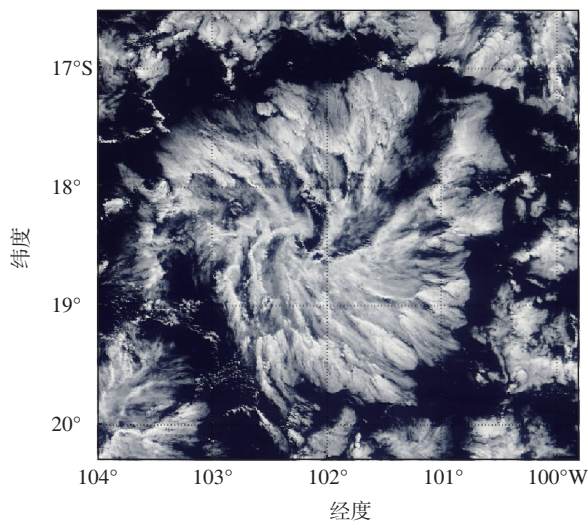
2 “射线状”云的定义及其时空分布特征

2.1 “射线状”云的定义

大量卫星云图分析表明,“射线状”云多呈近似圆形或椭圆形,通常有由云系中心向四周伸展出清晰的“径向云臂”,形状如古代车轮。研究还发现,“射线状”云个例的形态不尽相同,主要有 2 种形态:第一类“射线状”云具有明显的旋转特征(图 1);第二类“射线状”云发生在层积云中,径向云臂由中心向四周发散伸展,但旋转特征不明显(图 2)。图 1 和图 2 分别是由 Aqua 卫星和 Terra 卫星搭载的 MODIS 成像光谱仪提供的水平分辨率为 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 的可见光卫星云图。由图 1 分析得知,2 个“射线状”云的云系面积分别约为 $84\,400 \text{ km}^2$ (图 1a)、 $90\,396 \text{ km}^2$ (图 1b)。图 2 中 2 个“射线状”云的云系面积分别约为 $44\,435 \text{ km}^2$ (图 2a)、 $58\,290 \text{ km}^2$ (图 2b)。可以看出,虽然“射线状”云的面积有差异,但绝大部分个例属于中尺度云系^[3]。



(a) 2012年9月2日太平洋上空“射线状”云个例

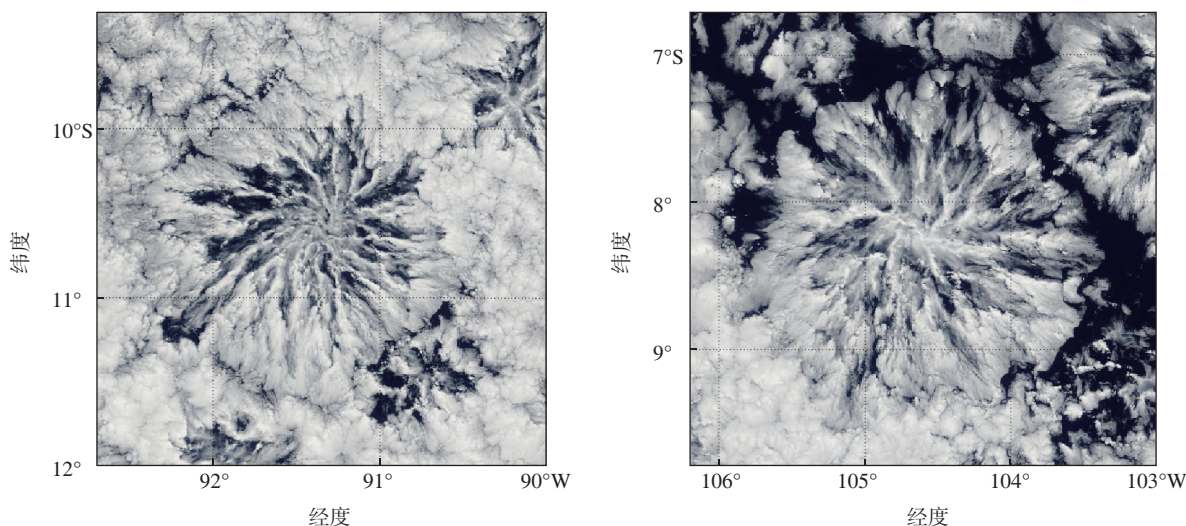


(b) 2013年6月6日太平洋上空“射线状”云个例

a中“射线状”云经纬度范围— $17.3^\circ \sim 13.5^\circ \text{S}$, $102.7^\circ \sim 98.4^\circ \text{W}$; b中“射线状”云经纬度范围— $20.3^\circ \sim 16.5^\circ \text{S}$, $104.0^\circ \sim 99.8^\circ \text{W}$ 。

图1 第一类“射线状”云个例的卫星云图

Fig.1 Satellite cloud imagery of the first type of “Actinoform Clouds”



(a) 2012年7月31日太平洋上空“射线状”云个例
a中“射线状”云经纬度范围— $12.0^{\circ}\sim 9.3^{\circ}\text{S}$, $92.7^{\circ}\sim 90.0^{\circ}\text{W}$; b中“射线状”云经纬度范围— $9.8^{\circ}\sim 6.7^{\circ}\text{S}$, $106.2^{\circ}\sim 103.0^{\circ}\text{W}$ 。

图2 第二类“射线状”云个例的卫星云图

Fig.2 Satellite cloud imagery of the second type of “Actinoform Clouds”

2.2 “射线状”云的地理分布特征

2012—2016年在太平洋上空共有439个“射线状”云个例。图3给出了“射线状”云个例的地理位置分布,可以看出,绝大多数“射线状”云发生在南半球低纬度地区($25^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{S}$),东南太平洋、秘鲁西岸处为南半球“射线状”云多发的海域。北半球有少量“射线状”云发生,其分布较南半球更显分散,多发生在 $10^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$,整个太平洋上空的“射线状”云大都发生在大洋的东部,北半球低纬度($0^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$)地区上空几乎无“射线状”云发生。

2.3 “射线状”云的时间分布特征

图4为2012—2016年439个“射线状”云个例逐月发生的频数分布。“射线状”云发生的高频月份为6、7、8月,中频月份为5、9、10月,低频月份为1、2、3、4、11、12月。发生频数最多的是7月,共计133个,最少的是2月,仅有1个,说明“射线状”云的发生频数与季节变化关系密切。

2012—2016年南北半球“射线状”云逐月发生频数见表1。结合图4可以看出,3—10月、12月南太平洋上空发生个数多于北太平洋上空,且7、8月相差最大,最大差距可达121个(7月),此时北半球为暖季,南半球为冷季。在1、2、11月中,北太平洋上空发生个数多于南太平洋上空,此时北半球为冷季,南半球为暖季。由此推知,冷季的气候更有利于“射线状”云的发生。

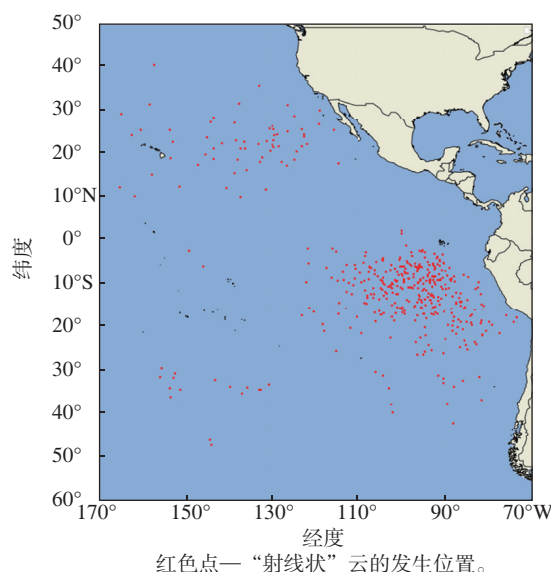


图3 2012—2016年发生在太平洋上空的“射线状”云的地理位置分布

Fig.3 Geographical distribution of the “Actinoform Clouds” that occurred over the Pacific Ocean from 2012 to 2016

3 “射线状”云典型个例分析

3.1 2014年7月个例概况

对2014年7月11日发生的“射线状”云个例生命周期进行分析。利用地球静止环境卫星(Geostationary Operational Environmental Satellites, GOES)红外卫星云图对2014年7月11日“射线状”云个例在4d内的移动路径进行追踪(图5),发现

该“射线状”云个例于2014年7月11日在东南太平洋秘鲁西海岸附近上空生成,在发展过程中逐渐向西北方向移动,最终在5°S附近消失。

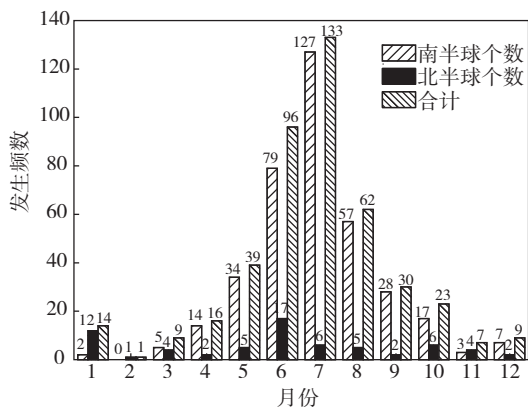


图4 2012—2016年太平洋上空“射线状”云个例南北半球逐月发生频数分布

Fig.4 Monthly frequency of the “Actinoform Clouds” over the Pacific Ocean in the Northern and Southern Hemispheres from 2012 to 2016

表1 2012—2016年南北半球“射线状”云个例逐月发生个数统计表

Table 1 Monthly distribution of the number of the “Actinoform Clouds” over the Northern and Southern Hemispheres from 2012 to 2016 单位:个

月份	“射线状”云个例数		
	南半球	北半球	总数
1	2	12	14
2	0	1	1
3	5	4	9
4	14	2	16
5	34	5	39
6	79	17	96
7	127	6	133
8	57	5	62
9	28	2	30
10	17	6	23
11	3	4	7
12	7	2	9

下面对2014年7月11日发生的“射线状”云个例的云系特征进行分析,选取该个例发展阶段的2个典型时刻,即2014年7月12日16:20 UTC和2014年7月13日17:05 UTC,“射线状”云中心分别位于13.31°S、95.84°W和9.31°S、101.45°W附近,云系面积分别约为43 404 km²和42 832 km²,对这2个时刻的云系特征进行分析。

3.2 2014年7月12日16:20 UTC个例分析

2014年7月12日16:20 UTC,东南太平洋上空“射线状”云发生在层积云中,如图6所示。

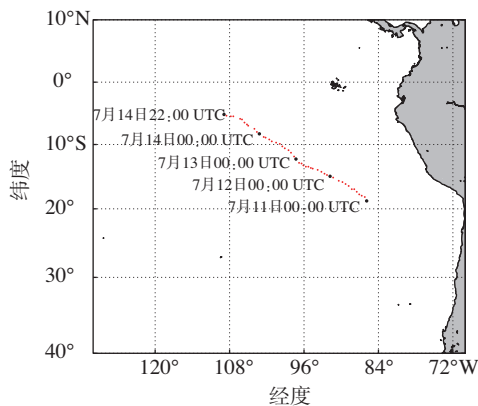


图5 2014年7月11日00:00 UTC—14日22:00 UTC“射线状”云个例的移动路径

Fig.5 Track of the “Actinoform Cloud” case from 00:00 UTC 11 to 22:00 UTC 14 July 2014

3.2.1 垂直剖面分析

“射线状”云的云顶气压为850~825 hPa。图7为沿图6中的AB线,利用ERA5再分析数据绘制的2014年7月12日16:20 UTC气温和相对湿度垂直剖面图。由气温垂直剖面图(图7a)可以发现,在850 hPa以下气温随高度升高而降低。但气压为850~825 hPa时,气温随高度升高反而升高,表明在云顶附近有1个逆温层。“射线状”云发生在对流层中,气温总体随高度升高而降低。但当大气逆温现象发生时,下层气温低于上层气温。对于在900~825 hPa层中的“射线状”云而言,大气逆温层会将水汽“困”在下层^[13],利于“射线状”云的形成。但大气逆温层不利于水汽的垂直输送,从而导致825 hPa以上的水汽含量较低,空气干燥,不利于云的形成。

由相对湿度垂直剖面图(图7b)可以看出,在850 hPa以下,相对湿度可达到90%,850~825 hPa相对湿度的垂直梯度最大。随着高度的升高,相对湿度急剧减小,825~700 hPa层的相对湿度较小(仅有10%),空气干燥,近乎无云形成。

3.2.2 水平特征分析

以下利用ERA5再分析数据对不同物理量水平分布特征进行分析。图8为该“射线状”云个例发生海域上空云量的水平分布图。900 hPa层(图8a),东侧云量数值较大,在“射线状”云的上空云量几乎为0,说明“射线状”云的高度高于900 hPa。875 hPa层(图8b),有云覆盖,表明该“射线状”云的高度大约在875 hPa。850 hPa层(图8c),西侧的云量较大,此时接近该“射线状”云的云顶附近,云量有所减小。

825 hPa层(图 8d),云量为0,为无云区域,表明“射线状”云位于此气压层下方。

结合图 7、8,可以推断该“射线状”云的云顶气压为 850~800 hPa。在后续进行物理量特征分析

时,将选取 900、875、850 和 825 hPa 这 4 个等压面进行分析,4 个等压面可分别表征该“射线状”云个例的低层(900 hPa)、中层(875 hPa)、云顶(850 hPa)和云顶之上(825 hPa)。

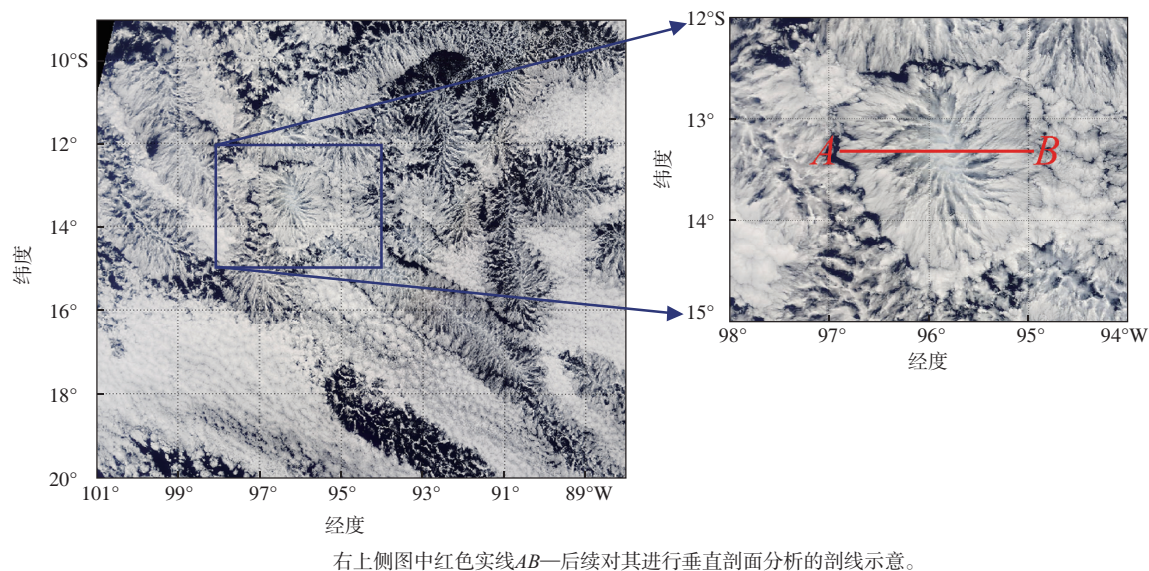


图 6 2014 年 7 月 12 日 16:20 UTC 东南太平洋上空“射线状”云个例
Fig.6 The “Actinoform Cloud” case over the Southeast Pacific Ocean at 16:20 UTC 12 July 2014

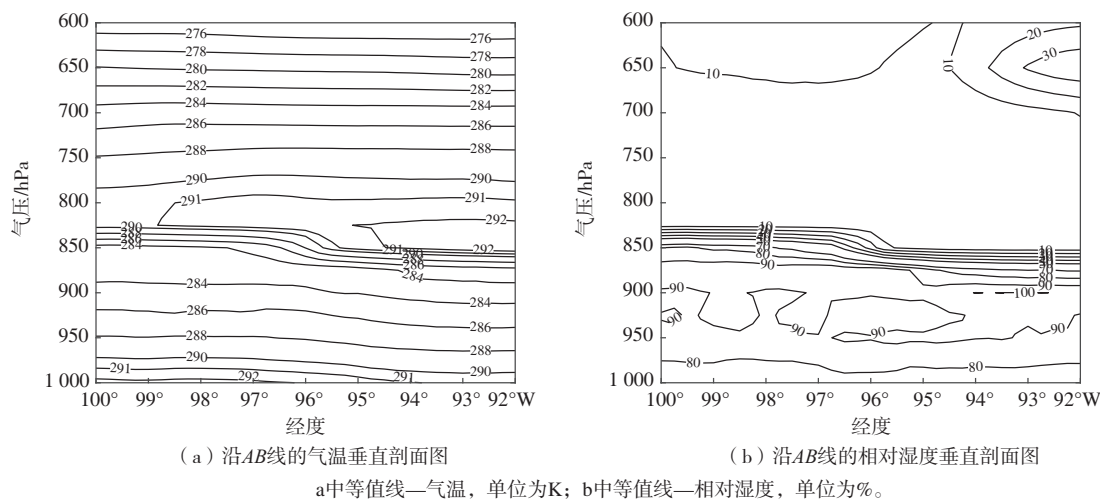


图 7 2014 年 7 月 12 日 16:20 UTC“射线状”云个例的垂直剖面分析图
Fig.7 Vertical cross section of the “Actinoform Cloud” case at 16:20 UTC 12 July 2014

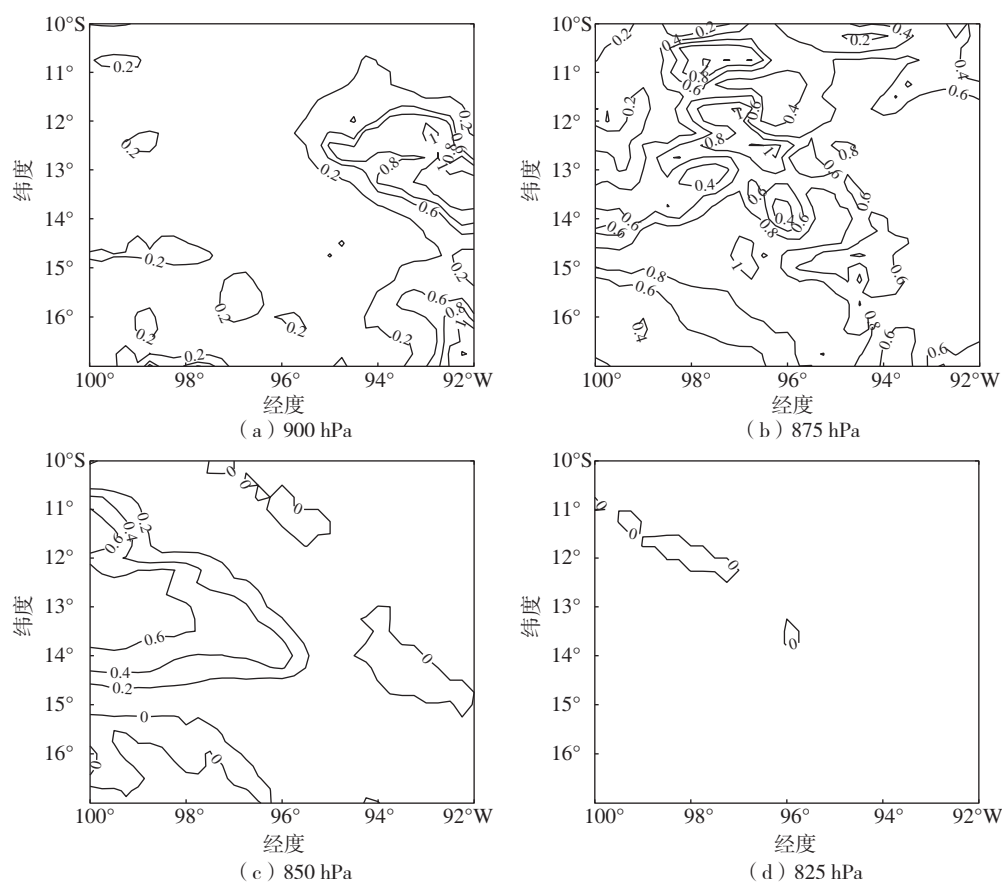
图 9 为“射线状”云系不同气压层的气温水平分布。900 hPa 层(图 9a),无闭合等温线出现,西北侧气温高,东南侧气温低。875 hPa 层(图 9b),由于气压降低,气温整体呈下降趋势,无闭合等温线出现,东北侧气温高,东南侧气温低。850 hPa 层(图 9c),云系周围出现较大的气温梯度,东北侧的气温明显升高,结合图 7a 的气温垂直剖面图,推测是由大气逆温层产生,在云系周围产生较大的气温水平梯度。

825 hPa 层(图 9d),受逆温层影响,气温略高于 850 hPa 层的气温,但水平气温梯度减小。

图 10 为该“射线状”云个例发生海域上空不同气压层上相对湿度场水平分布图。900 hPa 层(图 10a),“射线状”云系的相对湿度相对于周围大气处于较高水平,水汽在此汇集。875 hPa 层(图 10b),“射线状”云系相对湿度升高,推测可能是因为水汽增多而凝结成云。850 hPa 层(图

10c),相对湿度有所下降,推测是因为逆温层的存在使得大气层结较为稳定,不利于水汽的垂直向上输送。结合相对湿度的剖面图(图7b)可知,在云系周围有较大的相对湿度水平梯度(图10c)。

825 hPa层(图10d),相对湿度急剧减小,无闭合等值线出现,最大值仅有5%,与图7b中相对湿度的剖面图相对应,此气压层上水汽输送较弱,不利于云的形成。



等值线—云量,即网格框被云(液体或冰)覆盖的比例,取值范围为0~1;
“射线状”云个例经纬度范围—14.5°~12.5°S, 97.0°~94.8°W。

图8 2014年7月12日16:20 UTC“射线状”云个例的区域云量水平分布

Fig.8 Horizontal distribution of fraction of cloud cover of the “Actinoform Cloud” case at 16:20 UTC 12 July 2014

3.2.3 运动特征分析

图11为该“射线状”云发生海域上空不同气压层的垂直 p -速度场水平分布。900 hPa层(图11a),垂直 p -速度有负值中心,表明有较强的上升运动。875~825 hPa层(图11b—d),云体内部以上升运动为主,较900 hPa处上升运动有减弱趋势,推测是受逆温层的影响。

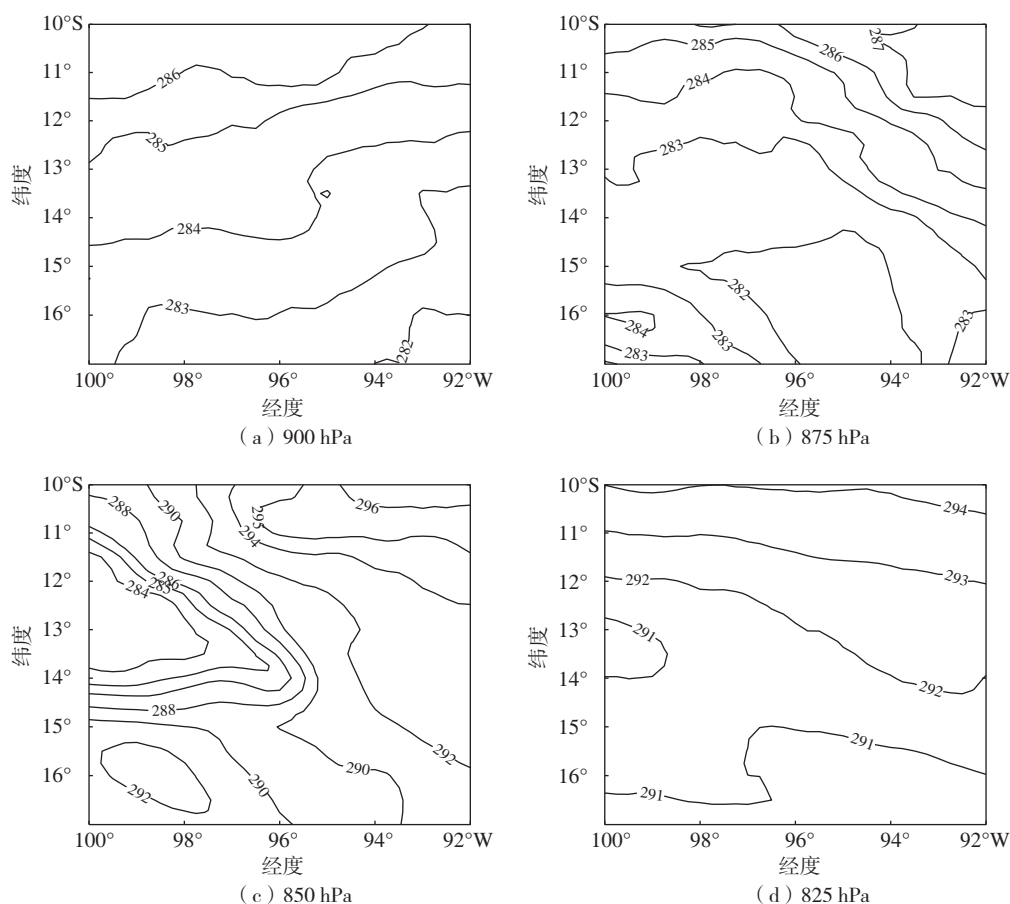
3.3 2014年7月13日17:05 UTC个例分析

2014年7月13日17:05 UTC,“射线状”云个例经过演化,形成了具有旋转形态、自组织结构明显的“射线状”云(图12)。

3.3.1 垂直剖面分析

图13为2014年7月13日17:05 UTC沿A'B'

线(图12)的气温和相对湿度垂直剖面图。在气温垂直剖面(图13a)中,有逆温层的产生,因而在该“射线状”云上空有无云区域。对比前一时刻气温垂直剖面(图7a),该个例逆温层下方等温线整体上移,逆温层中温度梯度略有下降,逆温层上空等温线不存在明显变化。在相对湿度垂直剖面(图13b)中,850 hPa层以下,相对湿度可达90%,850~825 hPa层的相对湿度垂直梯度最大。随着高度的升高,相对湿度急剧减小,800~700 hPa层的相对湿度较小,空气干燥,近乎无云形成。对比第1个个例的水汽含量剖面(图7b),该个例逆温层上空水汽含量有所增加,水汽含量梯度减小,说明逆温层阻碍上下水汽交换的作用减弱,推测逆温层有消散趋势。



等值线—气温, 单位为K; “射线状”云个例经纬度范围—14.5°~12.5°S, 97.0°~94.8°W。

图9 2014年7月12日16:20 UTC“射线状”云个例的区域气温水平分布

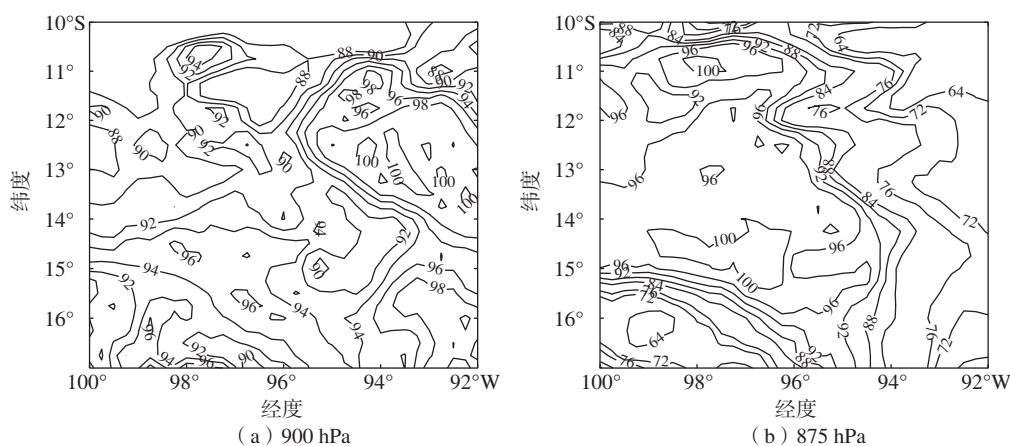
Fig.9 Horizontal distribution of air temperature of the “Actinoform Cloud” case at 16:20 UTC 12 July 2014

3.3.2 水平特征分析

图14为该“射线状”云个例发生海域上空云量水平分布。900 hPa层(图14a),有比例较小的云覆盖盖率。875 hPa层(图14b),在“射线状”云观测区域云覆盖盖率较低,说明该“射线状”云的主体部分位于875 hPa之上。在850 hPa层上(图14c),“射线状”云发生区域的云覆盖盖率较高,推测“射线状”云主体位

于850 hPa层。在825 hPa层上(图14d),云量有所减小,仅有10%,说明接近“射线状”云的云顶位置。

可以初步确定,该“射线状”云个例的云顶气压为825~800 hPa。后续选取900、875、850和825 hPa这4个等压面进行分析,分别表征该“射线状”云的云体底层(900 hPa)、云体低层(875 hPa)、云顶中层(850 hPa)和云顶部分(825 hPa)。



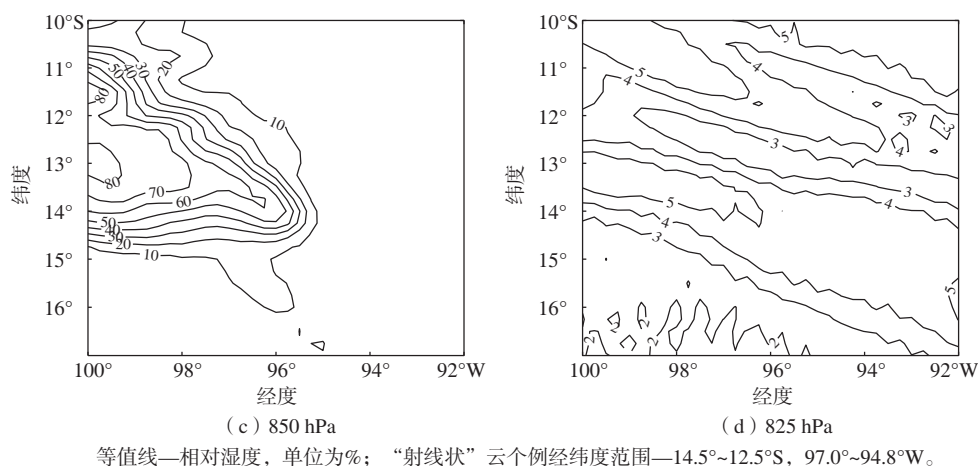


图 10 2014 年 7 月 12 日 16:20 UTC “射线状”云个例的区域相对湿度水平分布

Fig.10 Horizontal distribution of relative humidity of the “Actinoform Cloud” case at 16:20 UTC 12 July 2014

图 15 为“射线状”云发生区域不同高度气温水平分布。在 900 hPa 与 875 hPa 层上等温线大致沿东—西分布, 北侧温度高, 南侧温度低, 气温也随高度上升而降低 (图 15a—b)。850 hPa 层 (图 15c), 东、南两侧等温线梯度变大, 温度总体

东高西低。825 hPa 层 (图 15d), 温度升高的同时温度梯度变小。总体变化趋势与第 1 个个例气温水平分布 (图 9) 相似, 但 825 hPa 层上此个例的温度梯度明显大于第 1 个个例, 推测是由于云体升高导致。

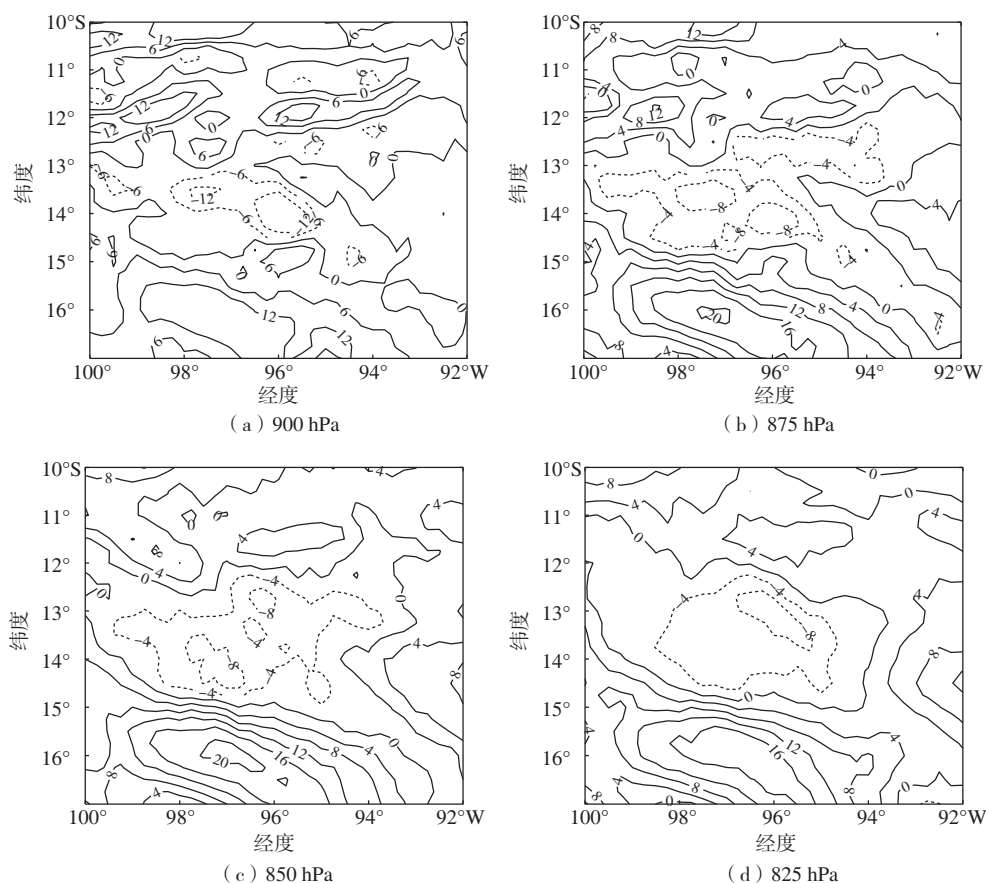
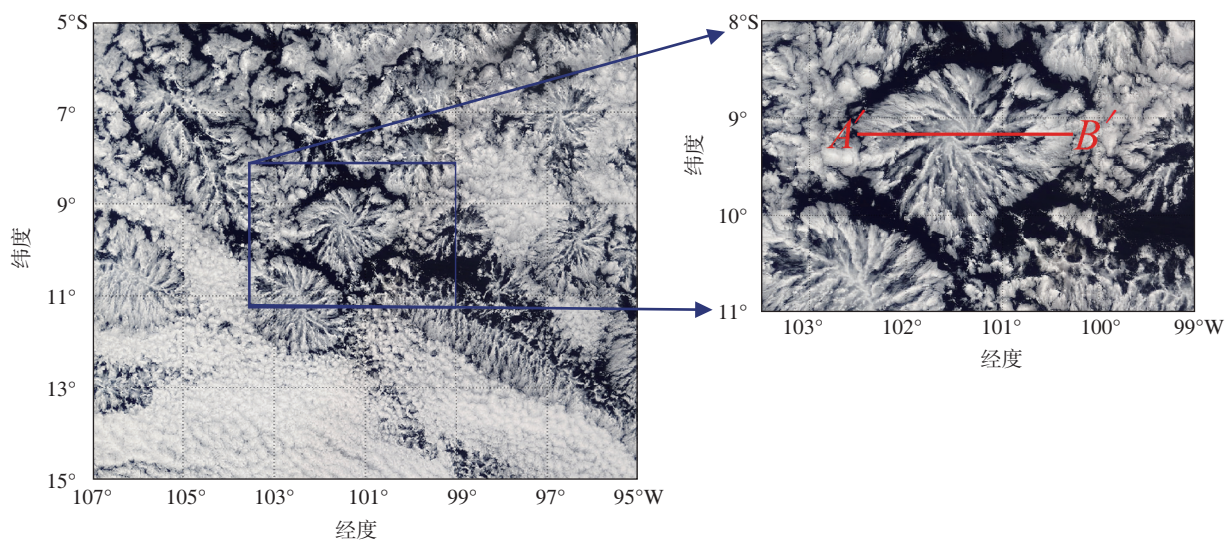


图 11 2014 年 7 月 12 日 16:20 UTC “射线状”云个例区域垂直 p -速度水平分布

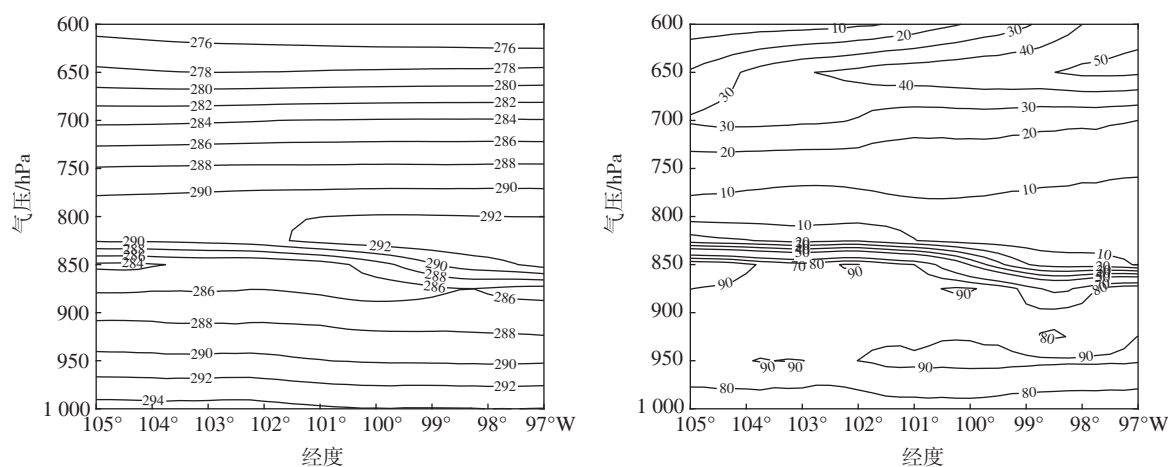
Fig.11 Horizontal distribution of vertical p -velocity of the “Actinoform Cloud” case at 16:20 UTC 12 July 2014



右上侧图中红色实线 $A'B'$ —后续对其进行垂直剖面分析的剖线示意。

图 12 2014 年 7 月 13 日 17:05 UTC 东南太平洋上空“射线状”云个例

Fig.12 The “Actinoform Cloud” case over the Southeast Pacific Ocean at 17:05 UTC 13 July 2014



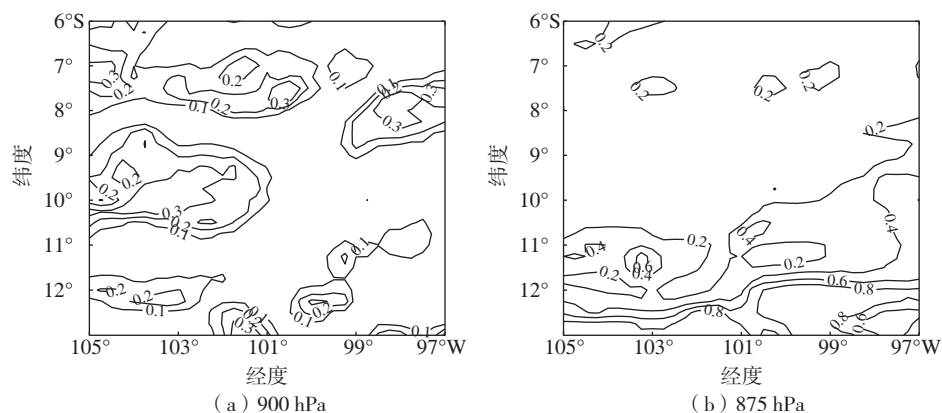
(a) 沿 $A'B'$ 线的气温垂直剖面图

(b) 沿 $A'B'$ 线的相对湿度垂直剖面图

a中等值线—气温, 单位为K; b中等值线—相对湿度, 单位为%。

图 13 2014 年 7 月 13 日 17:05 UTC “射线状”云个例垂直剖面分析图

Fig.13 Vertical cross section of the “Actinoform Cloud” case at 17:05 UTC 13 July 2014



(a) 900 hPa

(b) 875 hPa

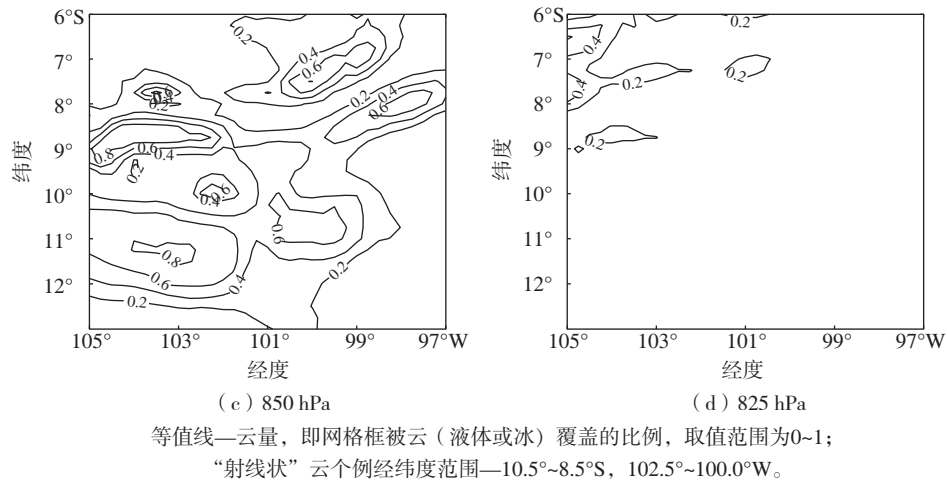


图14 2014年7月13日17:05 UTC“射线状”云个例区域云量水平分布

Fig.14 Horizontal distribution of fraction of cloud cover of the “Actinoform Cloud” case at 17:05 UTC 13 July 2014

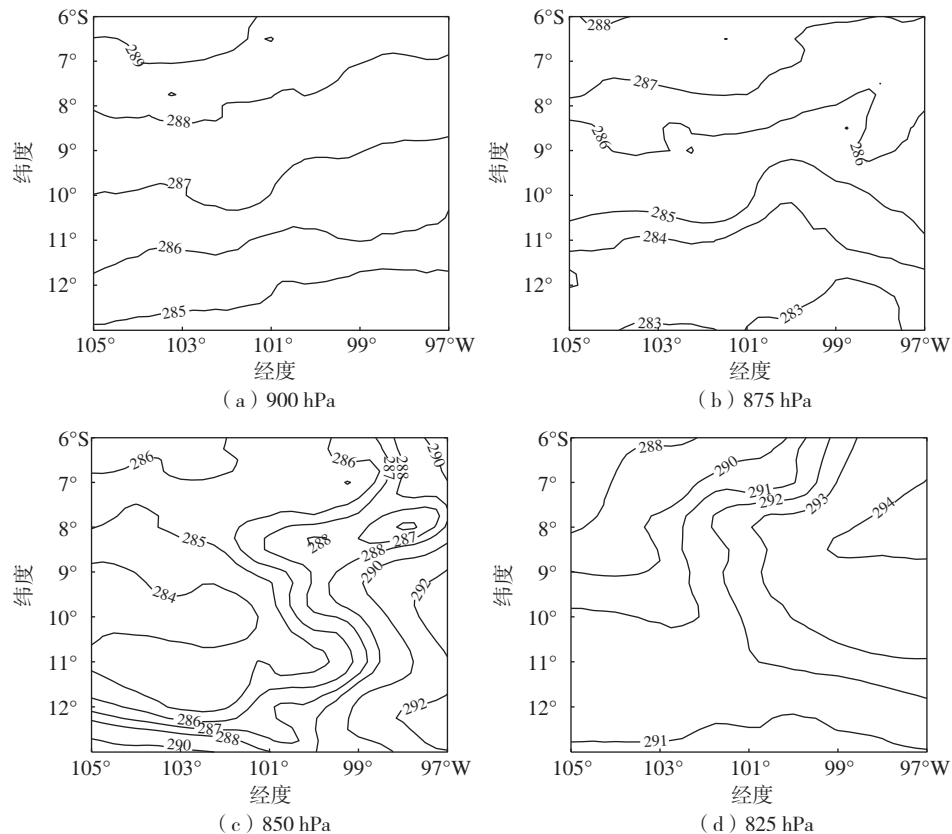
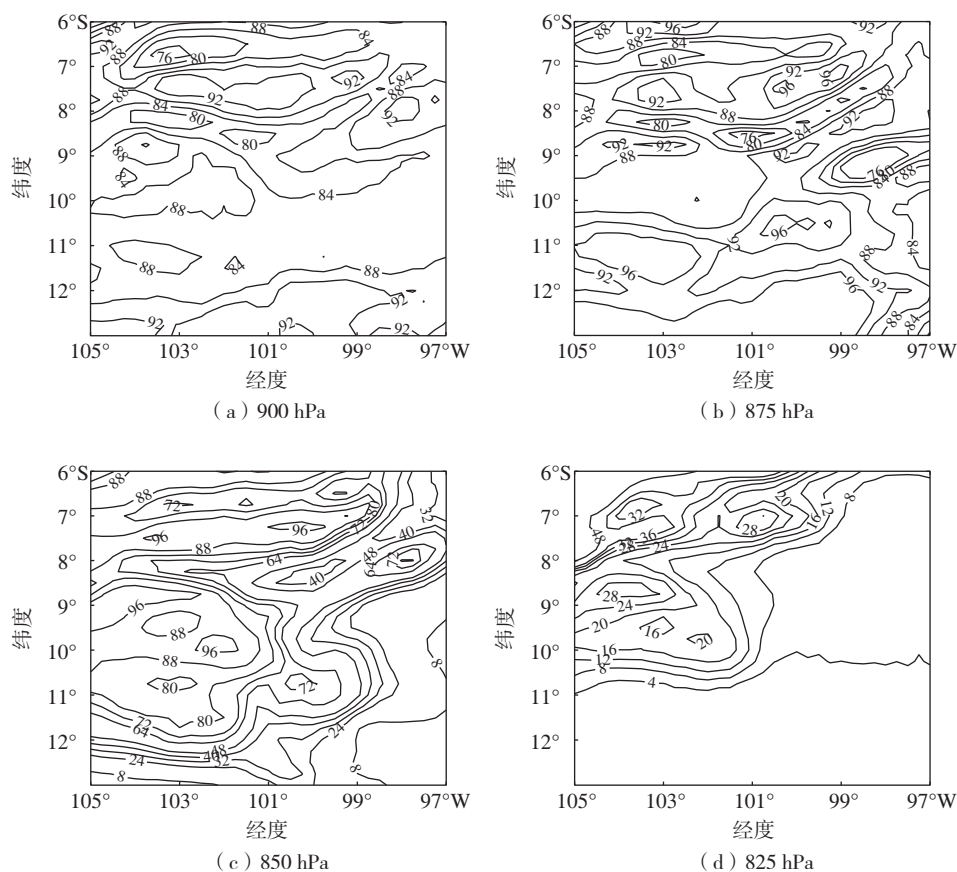


图15 2014年7月13日17:05 UTC“射线状”云个例区域气温水平分布

Fig.15 Horizontal distribution of air temperature of the “Actinoform Cloud” case at 17:05 UTC 13 July 2014

图16为该“射线状”云发生时相对湿度水平分布。对比第1个个例的相对湿度水平分布图(图10)可以看出,第2个个例在垂直方向上的变化规律与第1个个例类似,相对湿度随高度上升先增后减,同样在875~850 hPa处,水汽含量逐渐升高,有利于“射线状”云的形成(图16a—b),而

该个例相比第1个个例在850 hPa和825 hPa层上的相对湿度及相对湿度梯度却有显著增加(图16c—d),说明相较于第1个个例,该个例湿度也向高处扩散,说明该个例在演变过程中逆温层对水汽上下交换的抑制作用在减弱,结合卫星云图推测云系结构正在消散。



等值线—相对湿度, 单位为%; “射线状”云个例经纬度范围— $10.5^{\circ}\sim 8.5^{\circ}\text{S}$, $102.5^{\circ}\sim 100.0^{\circ}\text{W}$ 。

图 16 2014 年 7 月 13 日 17:05 UTC “射线状”云个例区域相对湿度水平分布

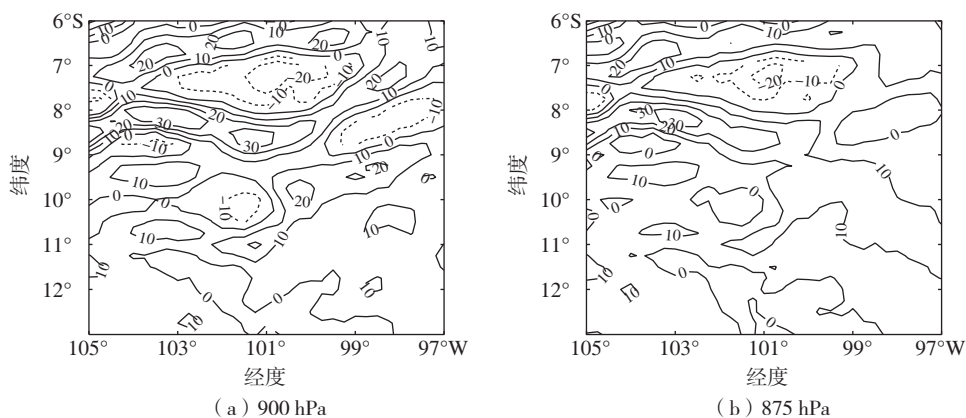
Fig.16 Horizontal distribution of relative humidity of the “Actinoform Cloud” case at 17:05 UTC 13 July 2014

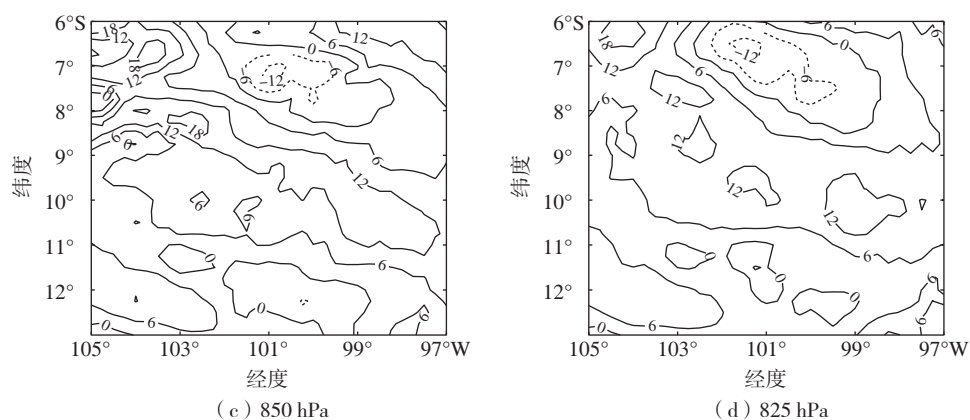
3.3.3 运动特征分析

图 17 为该“射线状”云发生海域上空不同气压层的垂直 p -速度场水平分布。在低层(图 17a), 垂直方向以上升运动为主, 即低层大气携带水汽向上运动, 形成云。在接近云顶处(850 hPa 附近, 图 17b), 受逆温层影响, 水汽被阻碍, 无法继续向上输送, 垂直速度近乎为 0。在 850~825 hPa 层上(图

17c—d), 垂直方向 p -速度为正, 有下沉气流, 推测是由于云系上空的空气向下运动。

综合垂直方向与水平方向物理量场的分析, 可以推测“射线状”云为浅对流性云系, 在逆温层以下, 以上升运动为主; 而逆温层阻碍了水汽的上升运动, 使得“射线状”云位于较低的大气层中。





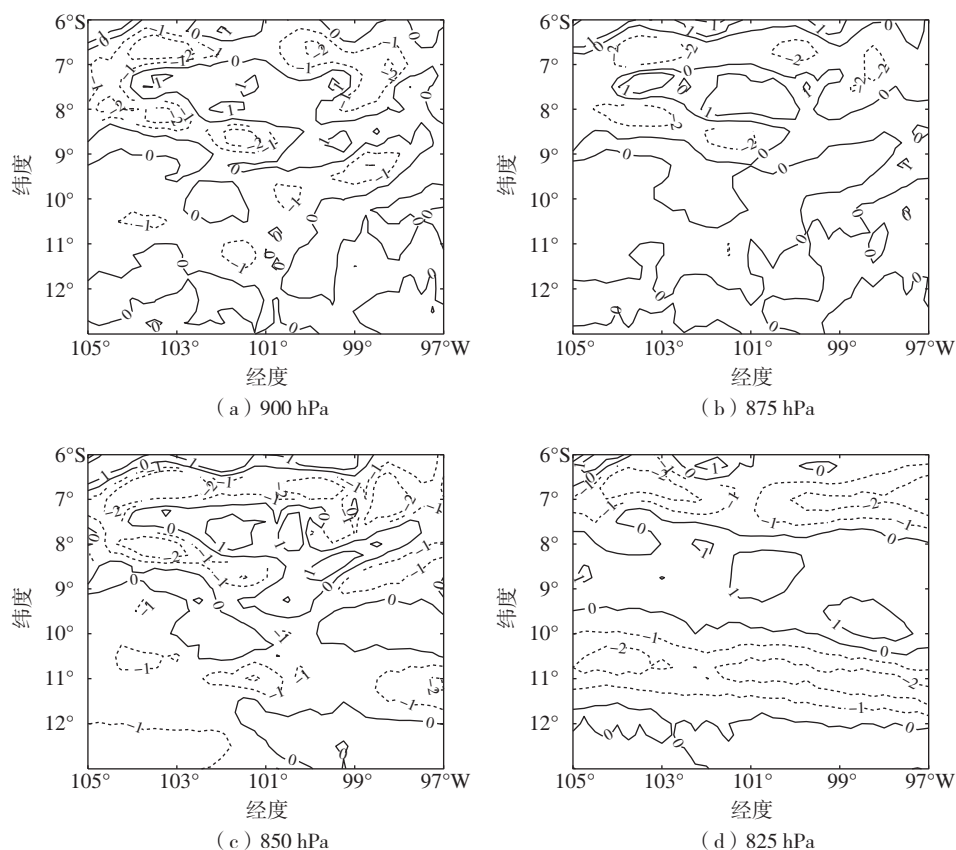
等值线—垂直 p -速度场, 单位为 $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$; “射线状”云个例经纬度范围— $10.5^{\circ}\sim 8.5^{\circ}\text{S}$, $102.5^{\circ}\sim 100.0^{\circ}\text{W}$ 。

图 17 2014 年 7 月 13 日 17:05 UTC “射线状”云个例区域垂直 p -速度水平分布

Fig.17 Horizontal distribution of vertical p -velocity of the “Actinoform Cloud” case at 17:05 UTC 13 July 2014

云系于 2014 年 7 月 12 日 16:20 UTC—13 日 17:05 UTC 经过演变开始呈顺时针旋转态势(图 12),云系中心有“眼”状结构。图 18 为相对涡度水平分布图,在 900~875 hPa(图 18a—b),有正相对涡度,以顺时针运动为主。由卫星云图(图 12)同样

可以看到,云系呈顺时针旋转态势。云系中心盛行上升气流,与垂直 p -速度场的分布特征相匹配。在 850 hPa 层(图 18c),相对涡度略有减小,气流的旋转程度减弱。在 825 hPa 层(图 18d),旋转结构消失,云系上层盛行下沉气流。



等值线—相对涡度, 单位为 10^{-5} s^{-1} ; “射线状”云个例经纬度范围— $10.5^{\circ}\sim 8.5^{\circ}\text{S}$, $102.5^{\circ}\sim 100.0^{\circ}\text{W}$ 。

图 18 2014 年 7 月 13 日 17:05 UTC “射线状”云个例相对涡度水平分布

Fig.18 Horizontal distribution of relative vorticity of the “Actinoform Cloud” case at 17:05 UTC 13 July 2014

4 结论

利用 NASA 提供的 Aqua 卫星和 Terra 卫星搭载的 MODIS 可见光卫星云图以及 ECMWF 提供的 ERA5 再分析数据,对 2012—2016 年发生在太平洋上空的“射线状”云的时空分布特征进行分析,并对 2014 年 7 月 11 日“射线状”云典型个例 2 个不同阶段的物理量特征进行分析,得到的主要结论如下:

(1)“射线状”云系的形态呈近似圆形或椭圆形特征,有清晰的径向云臂由云系中心向四周延伸。2012—2016 年发生在太平洋上空的“射线状”云主要分布在太平洋东南部的秘鲁西岸处,在赤道以北也发现少量“射线状”云个例,但绝大部分个例分布在 $30^{\circ}\text{S}\sim 0^{\circ}$ 、 $120^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{W}$ 的区域内。全年各月份均有“射线状”云发生,高频发生月份为 6、7、8 月,低频发生月份为 1、2、3、4、11、12 月。大气逆温层对“射线状”云的发生有重要作用,“射线状”云低层以上升运动为主,水平运动较弱;云顶附近受大气逆温层影响,水汽无法继续垂直向上输送,妨碍了云系向上发展,导致“射线状”云上空湿度较低。

(2)利用 GOES 红外卫星图像进一步对云系个例的演化路径进行了分析,推测该“射线状”云可能具有 2~3 d 的生命周期,并且在云系发展过程中出现具有“眼状”结构的旋转形态。

尽管本文对 2012—2016 年太平洋上空“射线状”云时空分布特征以及 2014 年 7 月 11 日的“射线状”云个例的特征进行了分析,对“射线状”云有了初步的认识,但在“射线状”云生成与消亡机制方面仍有许多问题,如“射线状”云的生成是否与洋流有密切联系,后续还需搜集更多个例,对其基本特征和动力学机制开展更深入的研究。

致谢: 本文得到中国海洋大学大学生 SRDP 项目(202310423006X)的资助,傅刚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。全体作者对中国海洋大学海洋与大气学院李鹏远老师、研究生王忠石给予的多方面帮助表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] HOWARD L. XVIII. On the modifications of clouds, and on the principles of their production, suspension, and destruction; being the substance of an essay read before the Askesian Society in the session 1802-3 [J]. *Philos Mag*, 1803, 16(62): 97-107.
- [2] DAVIES R, GARAY M. Actinoform clouds of the south Pacific: self-organization in the marine boundary layer [C]//7th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography. Wellington, New Zealand: American Meteorological Society, 2003: 136-137.
- [3] ORLANSKI I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1975, 56(5): 527-530.
- [4] ATKINSON B W, ZHANG J W. Mesoscale shallow convection in the atmosphere [J]. *Rev Geophys*, 1996, 34(4): 403-431.
- [5] AGEE E M. Observations from space and thermal convection: a historical perspective [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1984, 65(9): 938-949.
- [6] BUGAEV V A. Dynamic climatology in the light of satellite information [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1973, 54(5): 394-418.
- [7] KRUEGER A F, FRITZ S. Cellular cloud patterns revealed by tiros I [J]. *Tellus*, 1961, 13(1): 1-7.
- [8] AGEE E M, CHEN T S, DOWELL K E. A review of mesoscale cellular convection [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1973, 54(10): 1004-1012.
- [9] GARAY M J, DAVIES R, AVERILL C, et al. Actinoform clouds: overlooked examples of cloud self-organization at the mesoscale [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2004, 85(10): 1585-1594.
- [10] 王忠石, 傅刚, 孙维康. 太平洋上空“射线状”云的观测分析 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2024, 54(5): 10-22.
- [11] 孙维康, 傅刚, 王忠石. 大西洋和印度洋上空“射线状”云的观测分析与数值模拟研究 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2024, 54(6): 11-22.
- [12] FU G, WANG Z S, ZHANG X Y, et al. First observational perspectives of “millipede clouds” over the eastern Pacific Ocean [J]. *Geophys Res Lett*, 2023, 50(24): e2023GL106265.
- [13] ZHANG J Q, ZHENG Y T, LI Z Q, et al. A 17-year climatology of temperature inversions above clouds over the ARM SGP site: the roles of cloud radiative effects [J]. *Atmos Res*, 2020, 237: 104810.