

李晓东,盛立芳,邱静怡,等.西太平洋中南部冬季悬空波导统计分析及其成因初探[J].海洋气象学报,2017,37(2):51-56.  
Li Xiaodong, Sheng Lifang, Qiu Jingyi, et al. Preliminary investigation on the winter elevated duct over south-central western Pacific Ocean[J]. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(2): 51-56. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.02.006. (in Chinese)

## 西太平洋中南部冬季悬空波导统计分析及其成因初探

李晓东, 盛立芳, 邱静怡, 刁一娜, 刘珊

(中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 利用2015年11月—2016年1月船载GPS探空数据和欧洲中心ERA-Interim再分析资料,对西太平洋中南部海域悬空波导现象进行了统计分析。探空资料分析表明:该区域出现悬空波导的发生概率为47%,平均高度为1 393 m,平均厚度为205 m,平均强度为11.7 M-unit,平均截止波长为2.7 m。悬空波导发生时,天气晴朗,云量较少,以积云为主。进一步分析发现5~30°N范围内悬空波导发生概率高达77%,在800 hPa左右高度存在强悬空波导现象。ERA-Interim再分析资料表明强悬空波导出现在巨大反气旋运动区,副热带高压内部缓慢下沉引起的干燥大气与海洋边界层内湿润的、上升运动大气相遇,在800 hPa附近形成较强的相对湿度梯度和逆温,导致强悬空波导的发生。

**关键词:** 悬空波导; GPS探空数据; 西太平洋中南部; 副热带高压

**中图分类号:** P401 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2017)02-0051-06

**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.02.006

## Preliminary investigation on the winter elevated duct over south-central western Pacific Ocean

LI Xiaodong, SHENG Lifang, QIU Jingyi, DIAO Yina, LIU Shan

(College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract** The characteristics of elevated duct over south central region of western Pacific from November 2015 to January 2016 was analyzed by ship-based GPS sounding and ECMWF reanalysis data (ERA-Interim). The results showed that the occurrence probability of elevated duct was 47%. The mean height, thickness, and magnitude were 1 393 m, 205 m, and 11.7 M-unit, respectively. When elevated duct occurred, the weather was fine with little cumulus. The occurrence probability of elevated duct in 5—30°N region was up to 77%, intense elevated duct existed at about 800 hPa. ERA-Interim reanalysis data indicated that the intense elevated duct occurred in huge anticyclones. Strong relative humidity gradient and temperature inversion, which make for the intense elevated duct, was caused by encounter of slowly sinking dry air inside the subtropical anticyclone with the wet ascending marine boundary air.

**Key words** elevated duct; GPS radiosonde; south-central western Pacific; subtropical high

### 引言

大气波导是对流层大气中一种异常的大气折

射结构<sup>[1]</sup>。大气波导能够将电磁能量获陷在波导结构内,改变电磁波的传播路径及空间能量分布,从而能将电磁波传播至电磁系统的水平视距之外,

收稿日期:2017-03-12; 修订日期:2017-05-19

作者简介:李晓东(1992—),男,硕士生,主要从事海上大气波导研究,lixiaodong1819@126.com。

通信作者:盛立芳(1966—),女,博士,教授,主要从事海气边界层观测研究,shenglf@ouc.edu.cn。

使雷达的实际探测距离大于雷达视距,实现超视距探测<sup>[2]</sup>。另一方面,大气波导使部分电磁波被截获,使得电磁波可能无法到达正常大气下能够传播覆盖的范围,在该区域形成电磁盲区<sup>[3]</sup>。在波导传播状态下,作用距离的延伸也意味着雷达可能探测到较远处的陆地杂波和海杂波,使电磁系统杂波增强,减弱电磁系统的探测性能,增大系统的测量误差<sup>[4]</sup>。

海上大气环境具有极易形成大气波导的条件,大气波导现象发生概率较高,持续时间长,比较稳定<sup>[5]</sup>。蔺发军等<sup>[6]</sup>利用1986—1999年的船舶探空资料对 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $100\sim 140^{\circ}\text{E}$ 海域大气波导进行了统计分析,发现该海域蒸发波导的出现概率高达85%以上,高度一般在15 m左右,而海上低空大气波导的出现概率在15%~40%之间。唐海川等<sup>[7]</sup>基于白翎岛和济州岛上的探空资料,发现黄海大气波导发生概率较高,春、秋季大气波导出现频率最高,夏、冬季次之。成印河等<sup>[8]</sup>利用1998年南海船舶GPS探空资料对该海域夏季风期间悬空波导现象进行统计分析,发现其发生概率为30%左右,从北到南逐渐增加,波导层高度逐渐降低。Zhao等<sup>[9]</sup>利用2010—2012年春季印度洋航次船舶GPS探空数据对南海及热带东印度洋海域大气波导进行统计分析,结果表明,蒸发波导的发生概率为75%,平均高度为15 m,悬空波导发生概率为44%,平均高度为1 004 m,平均厚度为62 m,平均强度为7.9 M-unit。Cheng等<sup>[10]</sup>运用2012—2016年秋季南海航次船舶GPS探空数据对南海上空大气波导进行统计分析,结果表明,发生悬空波导现象的概率为40%,平均厚度为150 m,平均强度为8 M-unit,秋季南海悬空波导的发生概率及特征量值高于南海夏季风时期<sup>[8]</sup>。

综上所述,探空资料是海上大气波导统计分析的常用资料,通过探空资料研究中国附近海域大气波导逐渐成为了一个重要的研究方向,并得到了一定的研究成果。国内对海上大气波导现象的研究主要集中在对中国附近的黄海、南海和热带东印度洋区域。西太平洋作为重要的战略区域,其地区形势与中国国家安全息息相关。本文利用西太平洋中南部海域船舶GPS探空数据,对该海域悬空波导现象进行统计分析,并结合再分析资料对该地区悬空波导现象的成因进行初步分析。

## 1 资料与方法

### 1.1 数据资料

船舶探空数据:2015年11月—2016年1月5日在西太平洋中南部进行了船舶GPS探空观测(图1)。船舶GPS探空观测站点分布主要为3个断面: $146^{\circ}\text{E}$ 经度断面( $22\sim 36^{\circ}\text{N}$ )、 $143^{\circ}\text{E}$ 经度断面( $0^{\circ}\sim 22^{\circ}\text{N}$ )和赤道纬度断面( $137\sim 161^{\circ}\text{E}$ ),共得到有效船舶GPS探空观测数据66组。此次GPS探空观测使用北京无线电测量研究所自主研发的GPS探空仪。GPS探空仪每1 s返回一层数据,可以获得高分辨率气温、气压、湿度、风速和风向等垂直分布资料(表1)。

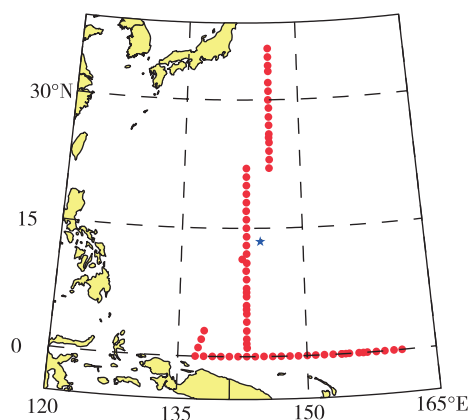


图1 船舶GPS探空站点和关岛探空站位置示意图(横坐标为经度,纵坐标为纬度,白色填色为海洋,黄色填色为陆地,红色标记为船舶探空数据站点,蓝色标记为关岛探空站点)

Fig. 1 The location of GPS sounding stations and Guam sounding station over the central-south part of the western Pacific (The x-axis is longitude. The y-axis is latitude. The yellow shaded area is land. The white shaded area is ocean. The red marks are the GPS sounding stations. The blue mark is Guam sounding station)

表1 GPS探空仪技术指标

Table 1 The technical specifications of GPS Sounding

	测量范围	分辨率	不确定度
温度/ $^{\circ}\text{C}$	+60~-90	0.1	$\pm 0.5$
相对湿度/%	0~100	1	$\pm 5$
气压/hPa	1 080~3	0.1	在1 080~100之间为 $\pm 1.0$ ; 在99~3之间为 $\pm 0.5$
风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0~150	—	$\pm 0.2$
风向/ $(^{\circ})$	0~360	—	$\pm 2$

海岛探空数据:关岛站(13.2~13.7°N, 144.6~145°E)(图1)探空数据由怀俄明大学网站(<http://weather.uwyo.edu>)提供。

海面天气观测记录:GPS探空观测时刻记录的海面气象要素包括云、空气温度、相对湿度、风、气压、天气现象等。

ERA-Interim再分析资料:ERA-Interim是欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium-Range Weather Forecasts,简称ECMWF)第三代再分析资料。ERA-Interim采用了四维变分同化技术,并对卫星资料进行了自适应偏差订正,与前两代再分析资料(ERA-15、ERA-40)相比较,再分析资料的质量得到了很大的提升。ERA-Interim采用2006年12月版的ECMWF综合预报系统(IFS Cy28r3),得到水平空间分辨率约为79 km(T255 spectral)的高斯网格数据,再通过双线性插值技术将其插值到0.125°~2.5°多种网格上。

红外云图:由美国热带气旋中心(Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies,简称CIMSS)热带气旋小组提供的地球同步运行环境卫星GOES-EAST(Geostationary Operational Environment Satellite-EAST)的红外云图,时间间隔为3 h。

## 1.2 数据处理方法

对流层中,大气波导现象可以根据修正大气折射率( $M$ )随高度( $h$ )变化的梯度来确定<sup>[11]</sup>:

$$M = \frac{77.6}{T} \times (p + 4810 \times \frac{e}{T}) + 0.157 \times h \quad (1)$$

式中 $T$ 为温度(K), $p$ 为气压(hPa), $h$ 为距离海平面的海拔高度(m), $e$ 为水汽压(hPa)。

利用温度 $T$ (K)、露点温度 $T_d$ (°C)有关的经验公式间接求得 $e$ <sup>[12]</sup>:

$$e = 6.11 \times \exp(19.7 \times \frac{T_d}{T}) \quad (2)$$

标准大气中 $M$ 随 $h$ 的升高而增大,当发生大气波导层结时, $M$ 随 $h$ 升高反而减小,故发生大气波导现象的判断条件为:

$$\frac{dM}{dh} < 0 \quad (3)$$

按照修正大气折射率廓线的形状和大气波导发生的位置可以将大气波导分为蒸发波导、表面波导和悬空波导。

船载GPS探空数据为高垂直分辨率数据,为消除脉动量的影响,对数据进行不等间距五点三次多

项式平滑处理<sup>[8]</sup>。

同样由于数据的垂直分辨率较高,在统计悬空波导现象时会得到许多较薄或强度较弱的大气波导层结,这类悬空波导层结不能有效地代表稳定的大气结构,因此引入截止波长 $\lambda$ 公式<sup>[13]</sup>:

$$\lambda_{\max} = \frac{2 \times C \times d \times \sqrt{\delta M}}{3} \quad (4)$$

式中: $C$ 是系数,对悬空波导取值为 $5.66 \times 10^{-3}$ ;  $d$ 为波导厚度(m); $\delta M$ 是波导强度(M-unit)。 $\lambda_{\max}$ 表示大气波导捕获电磁波的能力, $\lambda$ 越大表示悬空波导结构越稳定, $\lambda_{\max} \geq 1$ 时的悬空波导为有效悬空波导<sup>[14]</sup>。

## 1.3 探空数据比较

通过时间匹配,发现2015年11月23日12:40(UTC)船载GPS位置(14.01°N, 143.00°E)与关岛探空站比较靠近。为了对船载GPS探空数据质量有所了解,将该数据与关岛探空进行比较。图2给出该组匹配数据的对比结果,温度廓线、相对湿度廓线变化趋势相似度较高。在0~10 km的高度范围内,两种温度廓线的相关系数为0.99,相对湿度廓线相关系数为0.90。但是在某些高度段二者的趋势相反,造成差异的原因主要是两者所采用的不同型号传感器的滞迟时间、灵敏度和气球升速等。

## 2 悬空波导统计特征分析

悬空波导一般发生在3 km以下的对流层大气中,其结构主要由波导高度、波导厚度、波导强度等特征量来确定<sup>[9]</sup>。对66组船载GPS探空数据进行处理和统计得到31组有悬空波导现象,发生概率为47%,平均高度为1393 m,平均波导厚度为205 m,平均波导强度为11.7 M-unit,平均截止波长为2.7 m。与Zhao等<sup>[9]</sup>的研究相比,西太平洋中南部海域悬空波导的发生概率高于南海及热带东印度洋海域。另外悬空波导中有25.8%的复合波导(一个探空有2个或2个以上的悬空波导现象)。

将探空数据分赤道区域(0°~5°N)和非赤道区域(5°~30°N)分别进行统计,赤道区域共有33组船载GPS探空数据。发现:赤道区域悬空波导发生概率为22%,其中仅有1组数据有复合波导现象,占悬空波导事件的13%,发生悬空波导的平均高度为1278 m,主要发生高度为600 m左右,平均波导厚度为174 m,平均波导强度为9.4 M-unit,平均截止波长为2.0 m。

在非赤道区域获得30组船载GPS探空数据,

悬空波导发生概率高达 77%, 其中复合波导现象占 30%。悬空波导的平均高度为 1 426 m, 平均波导厚度为 214 m, 平均波导强度为 12.3 M-unit, 平均截止波长为 2.9 m。

总体而言, 非赤道区域悬空波导的发生概率远远大于赤道地区, 而且悬空波导有关物理量的量值也高于赤道地区, 在 2 000 m 左右的高度常常出现强悬空波导现象(表 2)。

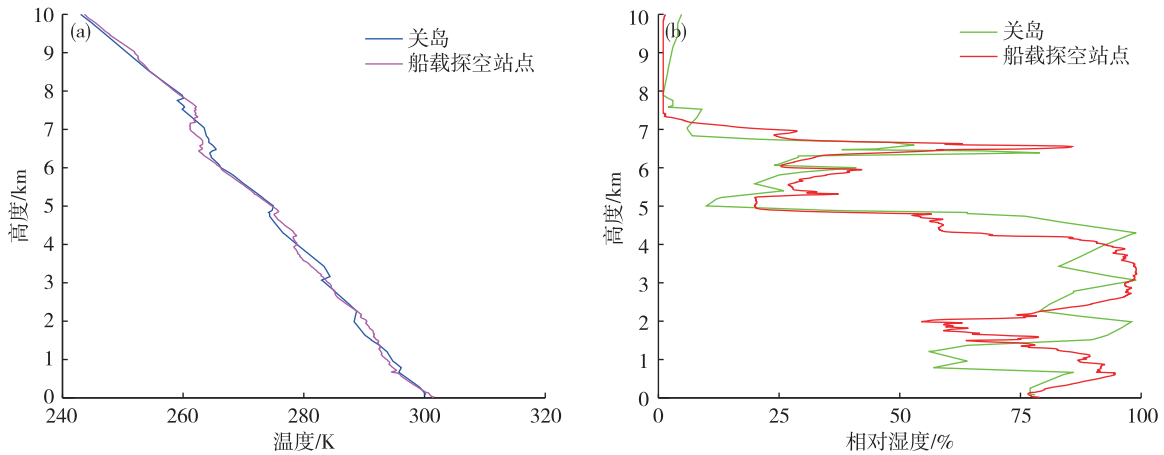


图 2 船载 GPS 和关岛温度 (a) 和相对湿度 (b) 探空廓线对比

Fig.2 The comparison of temperature (a) and relative humidity (b) profiles between GPS sounding station and Guam sounding station

表 2 西太平洋中南部强悬空波导特征

Table 2 The characteristics of intense elevated duct over the central-south part of the Western Pacific

纬度/ $^{\circ}$ N	经度/ $^{\circ}$ E	时间/UTC	波导底高 $h$ /m	波导厚度 $d$ /m	波导强度 $\delta M$ /M-unit	截止波长 $\lambda_{\max}$ /m
28	146	2015-11-18 T15:37	2 092	271	16.2	4.1
27	146	2015-11-18 T14:13	1 919	237	23.2	4.3
26	146	2015-11-19 T13:28	1 936	185	7.5	1.9
25	146	2015-11-19 T17:06	1 620	233	17.0	3.6
24	146	2015-11-20 T09:10	1 461	167	3.9	1.2
23	146	2015-11-20 T19:19	2 134	302	23.1	5.5
22	146	2015-11-21 T05:26	2 002	377	4.4	3.0
22	143	2016-11-27 T20:44	1 627	153	8.1	1.6
19	143	2016-11-26 T23:57	2 035	152	3.3	1.0
12	143	2016-01-04 T12:51	2 540	242	8.2	2.6
11	143	2016-01-02 T12:10	3 258	309	26.7	6.0
10	143	2016-01-01 T18:46	2 279	200	17.9	3.2
			2 115	310	26.4	5.8

为进一步研究悬空波导的空间分布特征,选取2015年11月—2016年1月关岛探空数据进行分析。数据统计发现:在1500 m~3000 m高空常常发生强悬空波导现象(图3),这与车载GPS探空所得到的强悬空波导现象相一致。

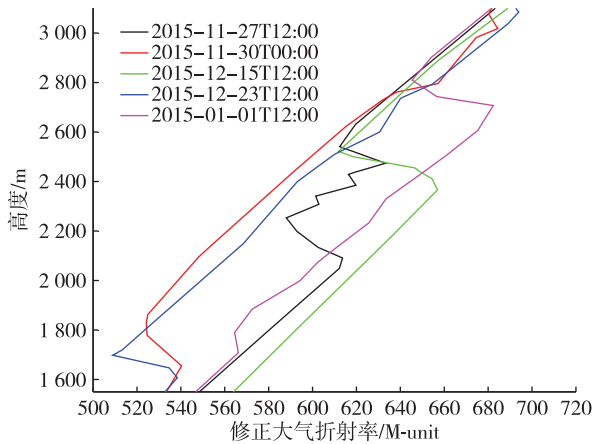


图3 关岛站不同时间修正大气折射率廓线图  
Fig.3 The modified refractivity profiles of Guam sounding station at different time

通过对发生强悬空波导现象探空资料的修正大气折射率、温度、相对湿度廓线对比发现,无论车载GPS探空数据还是关岛探空数据,发生强悬空波导处的相对湿度随高度的升高迅速降低,温度随高度的升高而升高(图略),这与以往的研究相一致<sup>[15]</sup>。统计表明,车载GPS探空站点发生强悬空波导时,平均相对湿度梯度为 $-0.51\%/m$ ,平均逆温强度为 $0.017\text{ K}/m$ 。

车载GPS探空时的海面天气观测发现,发生这些强悬空波导现象时,大气中以浓积云为主,云量较少,天气较为晴朗。

### 3 强悬空波导成因探究

选取关岛探空和车载GPS探空均发生强悬空波导的时间段(2016年1月1—4日),利用ERA-Interim再分析资料对西太平洋中部强悬空波导现象的成因进行探究。

从 $144^\circ\text{E}$ 垂直剖面图(图4)上可以看出,在 $7\sim 25^\circ\text{N}$ 、 $700\sim 400\text{ hPa}$ 的范围内存在一个相对湿度低值区,在 $800\text{ hPa}$ 附近相对湿度等值线密集,相对湿度梯度较大,相对湿度由 $70\%$ 迅速减少到 $10\%$ 以下。从垂直速度场可以看出,与低相对湿度区域对应的是弱的下沉气流,与高相对湿度区域对应的多为上升气流。对 $18^\circ\text{N}$ 作经向剖面(图略),发现同

样的现象, $130^\circ\text{E}\sim 130^\circ\text{W}$ 、 $750\sim 450\text{ hPa}$ 为相对湿度低值区。与车载GPS和关岛探空数据所显示的强悬空波导相对应, $800\text{ hPa}$ 附近为强悬空波导的高发区域。从图4也可以看出低相对湿度范围在 $500\text{ hPa}$ 处最大。选取 $500\text{ hPa}$ 做水平环流形势场(图5),可以看出,位势高度 $588\text{ dagpm}$ 等值线内为副热带高压,与之对应的是一个巨大的反气旋环流,车载GPS探空数据和关岛探空数据所显示的强悬空波导现象发生在该反气旋内。受副热带高压控制,反气旋内空气的相对湿度极低,为干气团。

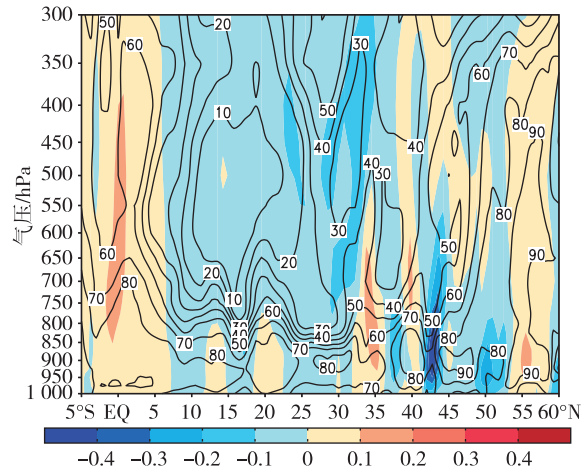


图4 2016年1月1—4日 $144^\circ\text{E}$ 纬向平均垂直速度、平均相对湿度剖面图(填色为垂直速度,等值线为相对湿度)

Fig.4 Zonal averaged vertical velocity and relative humidity profiles at  $144^\circ\text{E}$  from January 1st to 4th, 2016 (The shaded area is averaged vertical velocity. The contour lines are averaged relative humidity)

西太平洋中部强悬空波导的形成主要是由于副热带高压导致干燥的空气下沉,另一方面,由于冬季西太平洋海面温度高于气温,海洋对大气起加热的作用,海洋边界层内空气是湿润的上升运动,干湿空气叠加使得 $800\text{ hPa}$ 附近相对湿度梯度较大,形成逆温,产生强的悬空波导现象。

在副热带高压控制区域内天气晴朗、云量较少,云状以积云为主(图6),这与探空时海面天气观测记录相符合,说明在这种天气情况下容易发生强悬空波导现象。

### 4 小结

利用2015年11月—2016年1月车载GPS探空数据、关岛站探空数据、海面天气观测记录、ERA-Interim再分析资料和红外云图对西太平洋中南部海域悬空波导现象进行统计分析,并对该区域内发



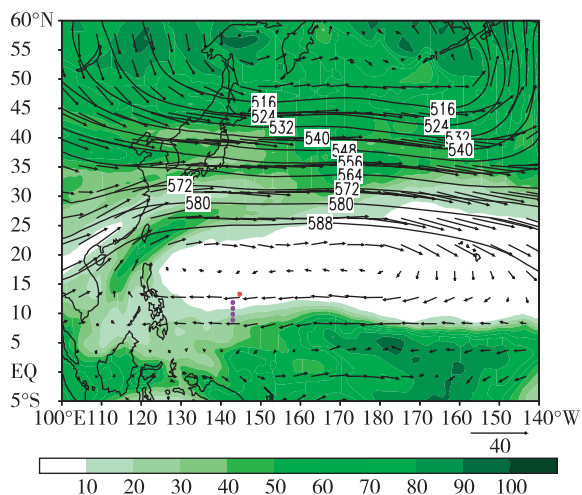


图5 2016年1月1—4日500 hPa平均相对湿度场、平均位势高度和平均风矢量场(填色为相对湿度,等值线为位势高度,矢量场为风矢量,紫色标记为在此期间发生强悬空波导的船载GPS探空站点,红色标记为在此期间发生强悬空波导的关岛探空站)

Fig.5 The spatial distributions of averaged relative humidity, geopotential height and wind field at 500 hPa from January 1st to 4th, 2016 (The shaded area is averaged relative humidity. The contour lines are averaged geopotential height. The vectors are averaged wind field. The red mark is Guam sounding station. The purple marks are GPS sounding stations, over which intense elevated duct happened during January 1st to 4th, 2016)

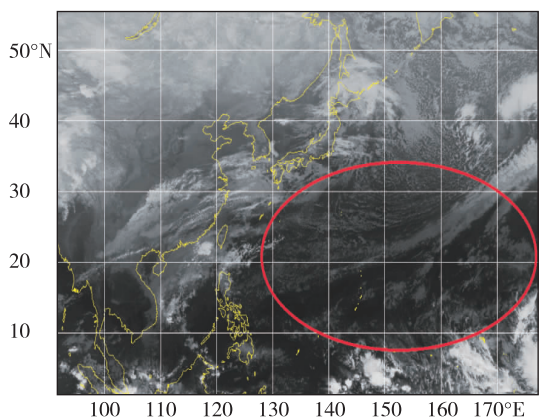


图6 2016年1月2日00时CIMSS提供的卫星云图(红色标记线内对应该时刻副高反气旋控制的范围)

Fig.6 The satellite cloud image from CIMSS at 00:00 UTC on January 2nd, 2016 (The area within the red line was controlled by subtropical anticyclone)

生强悬空波导现象的原因进行探究,得到以下结论:

1) 悬空波导的发生概率为47%,平均高度为1393 m,平均波导厚度为205 m,平均波导强度为11.7 M-unit。在西太平洋5~30°N范围内悬空波导发生概率高达77%,在800 hPa附近存在强悬空波

导现象。该海域悬空波导的发生概率高于中国附近海域。

2) 强悬空波导形成的主要原因是由于副热带高压导致干燥的下沉空气与海洋边界层内湿润的上升空气相遇,在800 hPa相对湿度梯度较大、较强逆温条件有利于波导的发生。

### 参考文献:

- [1] Freehafer J E, Kerr D E. Tropospheric refraction propagation of short radio wave[M]. Gallipoli: Peninsula Publishing, 1988: 162-163.
- [2] 周文瑜, 焦培南. 超视距雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [3] 白璐, 张沛, 吴振森, 等. 海上对流层大气波导顶部电磁盲区研究[J]. 电波科学学报, 2016, 31(2): 278-283.
- [4] 郭新民, 栾静, 金虎. 大气波导的形成及其对雷达探测的影响[J]. 信息化研究, 2012, 38(4): 30-32.
- [5] 成印河, 周生启, 王东晓. 海上大气波导研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(3): 318-326.
- [6] 蔺发军, 刘成国, 成思, 等. 海上大气波导的统计分析[J]. 电波科学学报, 2005, 20(1): 64-68.
- [7] 唐海川, 王华, 李云波. 黄海部分海域大气波导分布规律及其成因[J]. 海洋技术学报, 2008, 27(1): 115-117.
- [8] 成印河, 赵振维, 张玉生. 季风期间南海低空大气波导统计分析[J]. 电波科学学报, 2012, 27(2): 62-68.
- [9] Zhao X F, Wang D X, Huang S X, et al. Statistical estimations of atmospheric duct over the South China Sea and the Tropical Eastern Indian Ocean [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(23): 2794-2797.
- [10] Cheng Y H, Zhou S Q, Wang D X, et al. Observed characteristics of atmospheric ducts over the South China Sea in autumn [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2016, 34(3): 1-10.
- [11] Bean B R, Dutton E J. Radio Meteorology [M]. Dover: Dover Publications, 1968: 435.
- [12] 蔡世樵. 台湾地区蒸发管道之特性研究[D]. 台湾: 国立中央大学, 2004.
- [13] Zhu M, Atkinson B W. Simulated climatology of atmospheric ducts over the Persian Gulf area [J]. Bound Layer Meteor, 2005, 115(3): 433-452.
- [14] 成印河, 周生启, 王东晓, 等. 夏季风爆发对南海南北部低空大气波导的影响[J]. 热带海洋学报, 2013, 32(3): 1-8.
- [15] 戴福山. 大气波导及其军事应用[M]. 北京: 解放军出版社, 2002: 1-2.