

基于 ECMWF 再分析数据的大气波导分布规律研究*

王 华¹ 马 贲² 焦 林¹ 唐海川¹
WANG Hua¹ MA Ben² JIAO Lin¹ TANG Haichuan¹

1. 海军大连舰艇学院, 大连, 116018

2. 中国海警局, 北京, 100097

1. *Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China*

2. *China Coast Guard, Beijing 100097, China*

2019-12-16 收稿, 2021-03-07 改回.

王华, 马贲, 焦林, 唐海川. 2021. 基于 ECMWF 再分析数据的大气波导分布规律研究. 气象学报, 79(3): 521-530

Wang Hua, Ma Ben, Jiao Lin, Tang Haichuan. 2021. The analysis on distribution characteristics of atmospheric ducts based on ECMWF reanalysis data. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(3):521-530

Abstract Atmospheric ducts have significant impacts on electromagnetic wave propagation. Studying the distribution feature of atmospheric ducts is of great significance for analyzing electromagnetic wave propagation and effectiveness of radar and communication equipment. The feature values of atmospheric ducts are calculated based on the ERA-Interim reanalysis data, and these values are verified by rocketsonde data. On this basis, the feature values of global ducts are analyzed using the ERA-Interim data for the period of 2011—2016. The conclusions are as follows. The eastern part of the ocean and the western part of the continent in the trade wind belt are the high probability zone of the atmospheric ducts. There are six high probability zones and three little or no duct zones. The position, range, and probability of occurrence of these zones have seasonal variations. Season MAM (Mar—May) has the highest probability and the largest occurrence zone in the northern hemisphere, while Season SON (Sep—Nov) has the lowest probability and the smallest occurrence zone. Seasons DJF (Dec, Jan, Feb) and JJA (Jun—Aug) are between the two seasons. Season SON has the highest probability and the largest occurrence zone in the southern hemisphere, while Season MAM has the lowest probability and the smallest occurrence zone. The magnitude of atmospheric duct in the northern hemisphere is generally stronger than that in the southern hemisphere. Season MAM has the strongest magnitude of atmospheric duct in the northern hemisphere, followed by Season JJA. For Season SON, the sea areas with strong magnitude are the smallest, and the magnitude is the weakest. The magnitude of atmospheric duct in the South Pacific has no obvious seasonal variation, and its strength is weaker than that in the North Pacific. The strong magnitude zone of duct in the South Atlantic has the largest sea area and strongest in Season SON, and it has the smallest sea area and the weakest in Season DJF. The northern Indian Ocean has the strongest magnitude in Season MAM, which is the strongest zone in world ocean, and there is no atmospheric duct in Season JJA. The altitude of the atmospheric duct is low near the west coast of continent in the trade wind belt. As the distance from coast to the west increases, the altitude gradually increases. The high probability zone of the atmospheric duct is high altitude in Season SON and DJF in the northern hemisphere, the zone of high altitude is large, the low altitude in Season MAM and JJA, and the zone of high altitude is small. The high probability zone of the atmospheric duct is the high altitude in Season MAM and JJA in the southern hemisphere, and the zone of high altitude is large; the high probability zone of the atmospheric duct is the low altitude in Season SON and DJF, and the zone of high altitude is small. The altitude of atmospheric ducts in other low and middle latitudes offshore water is relatively low. In the inland sea areas surrounded by mainlands, the altitude of atmospheric ducts is the lowest.

Key words Atmospheric ducts, ERA-Interim, Ducts probability, Magnitude of ducts, Altitude of ducts

* 作者简介: 王华, 主要从事大气波导和电波传播研究。E-mail: dlwhua@sina.com

摘 要 大气波导对电磁波传播有显著的影响, 大气波导特征参量分布研究对于分析电磁波传播乃至雷达、通信等电子设备效能具有重要意义, 利用 ERA-Interim 数据计算大气波导特征参量, 并用海洋调查期间的低空探空火箭数据计算的大气波导进行了验证, 在此基础上用 2011—2016 年 ERA-Interim 温度、湿度分层数据统计分析了全球大气波导的发生概率、强度、高度, 得出的结论是: 大洋东部、大陆西部的信风带是大气波导的高发区, 大洋上大气波导的高发区(发生概率 > 50%)主要有 6 个, 分别是北太平洋海区、南太平洋海区、北大西洋海区、南大西洋海区、北印度洋海区、南印度洋澳大利亚西部海区; 同时, 存在 3 个大气波导低发区或无大气波导区(热带辐合带区、北半球中高纬度区、南半球中高纬度区)。这些大气波导高发和低发区的位置、范围、发生概率具有季节变化, 北半球 MAM 季(3—5 月)发生概率最高, 出现的范围最大, SON 季(9—11 月)概率最低, 出现的范围最小, DJF(12、1、2 月)、JJA(6—8 月)季节介于两者之间; 南半球 SON 季发生概率最高, 出现的范围最大, MAM 季概率最低, 出现的范围最小。北半球大气波导强度总体上强于南半球大气波导强度, 北半球 MAM 季大气波导较强海域范围最大, 强度最强, 其次为 JJA 季, SON 季大气波导较强海域范围最小, 强度最弱; 南太平洋大气波导强度季节变化不明显, 强度与北太平洋比较较弱, 南大西洋 SON 季大气波导较强海域范围最大, 强度最强, DJF 季大气波导较强海域范围最小, 强度最弱; 北印度洋 MAM 季大气波导强度强, 是大洋上波导最强的海域, 大气波导较强海域范围大, JJA 季基本没有大气波导。大气波导高度在信风带靠近大陆西岸海域高度较低, 随着向西离岸距离增大高度升高, 大气波导高发区的波导高度季节变化特征是: 北半球在 SON、DJF 季高度高, 波导高度高的区域面积大, MAM、JJA 季高度低, 波导高度高的区域面积小; 南半球在 MAM、JJA 季高度高, 波导高度高的区域面积大, SON、DJF 季高度低, 波导高度高的区域面积小; 其他中低纬度近岸海域大气波导高度较低, 大陆包围的内海大气波导高度最低。

关键词 大气波导, ERA-Interim, 波导概率, 波导强度, 波导高度

中图法分类号 P427

1 引 言

大气波导是在某些海域经常发生的现象 (Abdul, et al, 1991; Babin, 1996), 它能改变电磁波传播轨迹, 对雷达探测、无线电通信等有显著影响 (Dockery, 1988), 能产生超视距传播和大气波导盲区等现象, 也能增加雷达测量误差和杂波, 大气波导在军事领域有重要应用。大气波导对无线电信号的影响程度主要是由它的强度、厚度和高度等特征参数决定, 研究大气波导的分布规律就是研究这些特征参数的分布, 是研究大气波导对无线电信号影响的基础, 这些特征参数的分布主要与所在海域、季节、天气系统等因素有关。大气波导分布规律研究的方法按数据来源不同主要有两种, 一种是以各种无线电探空设备或飞行平台实测数据为数据源, 例如, Patterson(1982)利用全球 6 a 无线电探空站点测量数据研究了全球有关站点的大气波导分布规律, Craig 等(1995)利用无线电探空数据统计分析了欧洲大气折射率参数, Babin(1996)利用直升机的测量数据分析了位于弗吉尼亚州 Wallops 岛表面波导的季节变化, Brooks 等(1999)、Mentes 等(2007)、Cheng 等(2016)从事了相似的工作, 他们分别分析研究了波斯湾、土耳其的伊斯坦布尔、西北太平洋和中国南海的大气波导分布规律, 这些

研究的共同特点是研究单个测站的大气波导分布规律。另一种以再分析或大气数值预报模式垂向分层数据为数据源研究区域大气波导分布规律, 例如, Zhu 等(2005)利用 MM3 数据分析了波斯湾海域大气波导的分布规律, von Engeln 等(2004)利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)ERA-40 数据研究了全球大气波导气候分布, 该数据的经/纬度网格点为 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$, 在统计大气波导强度时, 将大气波导层中的大气修正折射率梯度视为大气波导强度, 大气波导强度是表示该层大气陷获电磁波能力的值, 反映大气波导对电磁波陷获能力的应该是陷获层顶和底大气修正折射率的差值。在统计每季度大气波导特征参数值时, 采用了平均值统计方法, 这与实际特征参数值的季节分布是有差别的, 比如, 赤道辐合带长年被对流云覆盖, 该区基本上没有大气波导现象, 应存在一个无大气波导的带状区域, 但由于采用均值统计方法, 使该区并没有呈现出无大气波导带。文中利用 ECMWF 提供的 ERA-interim 数据(经/纬度网格距为 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$)中的温度、比湿垂向分层数据, 计算全球大气修正折射率廓线, 并利用海洋调查期间获取的低空探空火箭数据计算的大气修正折射率与 ERA-Interim 数据计算结果进行比对, 然后利用该数据计算结果统计分析全球大气波导的出现概率、高度和强度分布特征。

2 数据和大气波导计算

2.1 数 据

大气波导统计分析数据采用 ECMWF 发布的 ERA-Interim 数据(简称 EID), 该数据是 ECMWF 自 2011 年开始发布的全球大气再分析数据, 经/纬度网格点为 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$, 从地面到 0.1 hPa 分为 60 层, 在高度 1000 m 以下有 11 层, 在海平面上层高度分别为 10、30、60、100、160、240、340、460、600、760、950 m, 数据每天 4 个时次, 分别是 00、06、12、18 时(世界时, 下同)。利用该数据库 2011—2016 年的温度和湿度分层数据计算大气修正折射率和大气波导特征参量值。

为了验证 EID 计算大气波导的可用性, 采用海上低空探空火箭数据(简称 LRD)计算的大气修正折射率和大气波导特征参量进行验证。LRD 为 2001—2003 年中国近海 15 个航次的温度、湿度廓线数据, 共有 357 组。数据测量的高度范围为海面至 1200 m 高度, 数据采样率为 1 Hz, 数据垂向分辨率平均约为 3 m。

2.2 大气波导计算

利用温度、湿度廓线计算大气折射率(N)可以通过 Bean 等(1968)给出的公式计算,

$$N(z) = \frac{77.6p(z)}{T(z)} - \frac{5.6e(z)}{T(z)} + 3.75 \times 10^5 \frac{e(z)}{T^2(z)} \quad (1)$$

式中, z 为地面以上高度(m), p 为气压(hPa), T 为绝对温度(K), e 为水汽压(hPa)。大气中是否存在大气波导采用大气修正折射率梯度法来判定, 大气修正折射率(M)与大气折射率的关系如下式所列,

$$M = N + \frac{z}{a} \times 10^6 = N + 0.157z \quad (2)$$

式中, a 为地球半径, 取 6371 km, 则地球曲率为 $1/a = 0.157 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$, 大气修正折射率的单位是: M 。大气修正折射率的梯度与大气折射率梯度的关系为

$$\frac{dM}{dz} = \frac{dN}{dz} + 0.157 \quad (3)$$

当 $dM/dz < 0$ 时, 大气出现陷获折射 (Turton, et al, 1988), 该层大气为陷获层, 即表示出现大气波导。大气波导的强度用 ΔM 表示, 它表示陷获电磁波的能力, $\Delta M = M_2 - M_1$, 其中 M_2 为陷获层顶层的大气修正折射率, M_1 为陷获层底层大气修正折射率, M_2 所对应的高度为大气波导顶部高度, 大气波导顶

部和底部的高度差为大气波导厚度, 大气波导底部的高度为在大气修正折射率廓线上与大气波导顶大气修正折射率值相等高度处的高度。

3 验 证

采用 2001—2003 年在中国近海获取的 LRD 计算大气修正折射率验证 EID 计算值, 共有 357 组数据, 比较两种数据计算的大气波导高度、强度、厚度值。LRD 首先需要进行质量控制, 去除错误值, 然后, 根据 LRD 测量的时间和位置, 在 EID 中找到邻近时刻最接近测量点位置的数据, 计算出该位置处的大气修正折射率廓线。为了比较两种数据计算的大气修正折射率差别, 将 LRD 采用 Akima 法插值到 EID 各垂向分层的层高上, 计算 EID 大气修正折射率的偏差均值(EID 计算值减去 LRD 计算值)和方差, 在此, 将 LRD 视为真值, 计算结果如图 1a 所示, 各层偏差均值和方差值列于表 1, 从图 1a 可见, 除了 10 m 层 EID 计算值大于 LRD 计算值, 其他层 EID 计算值均小于 LRD 计算值, 30 m 层的偏差均值最小, 为 -0.56, 随着高度的升高, 偏差均值逐渐增大, 在 950 m 层偏差均值达到 -9.3。偏差均方差也有类似的分布特点, 低层偏差均方差小, 10 m 层为 8.91, 高层偏差均方差大, 950 m 层为 11.95。计算两种数据的 357 组大气修正折射率廓线数据, LRD 和 EID 计算值的相关系数为 0.968, 说明 EID 与 LRD 计算值具有较好的一致性。

LRD 垂向分辨率平均可达 3 m, 其计算大气波导出现概率很高, 为了统计具有一定强度的大气波导出现概率, 在统计大气波导时, 设定大气波导强度强于 -2 M 时, 记为出现大气波导。两种数据计算都出现大气波导有 54 组, 大气波导顶部高度比较如图 1b 所示, 实线表示两种数据源拟合结果, 两种数据的相关系数为 0.527, 在高度小于 650 m 时, EID 计算值小于 LRD 计算值, 在高度大于 650 m 时, EID 计算值大于 LRD 计算值。

从大气波导强度的比较(图 1c)可知, 两种数据的相关系数为 0.805, 实线表示拟合结果, EID 计算的强度小于 LRD 计算值, 大气波导越强两者的差值越大, 说明 EID 计算的大气波导强度要小于实际的强度。大气波导厚度比较如图 1d 所示, 两种数据的相关系数为 0.669, 从拟合结果看, 多数情况下, EID 计算的大气波导厚度值大于实际大气波导

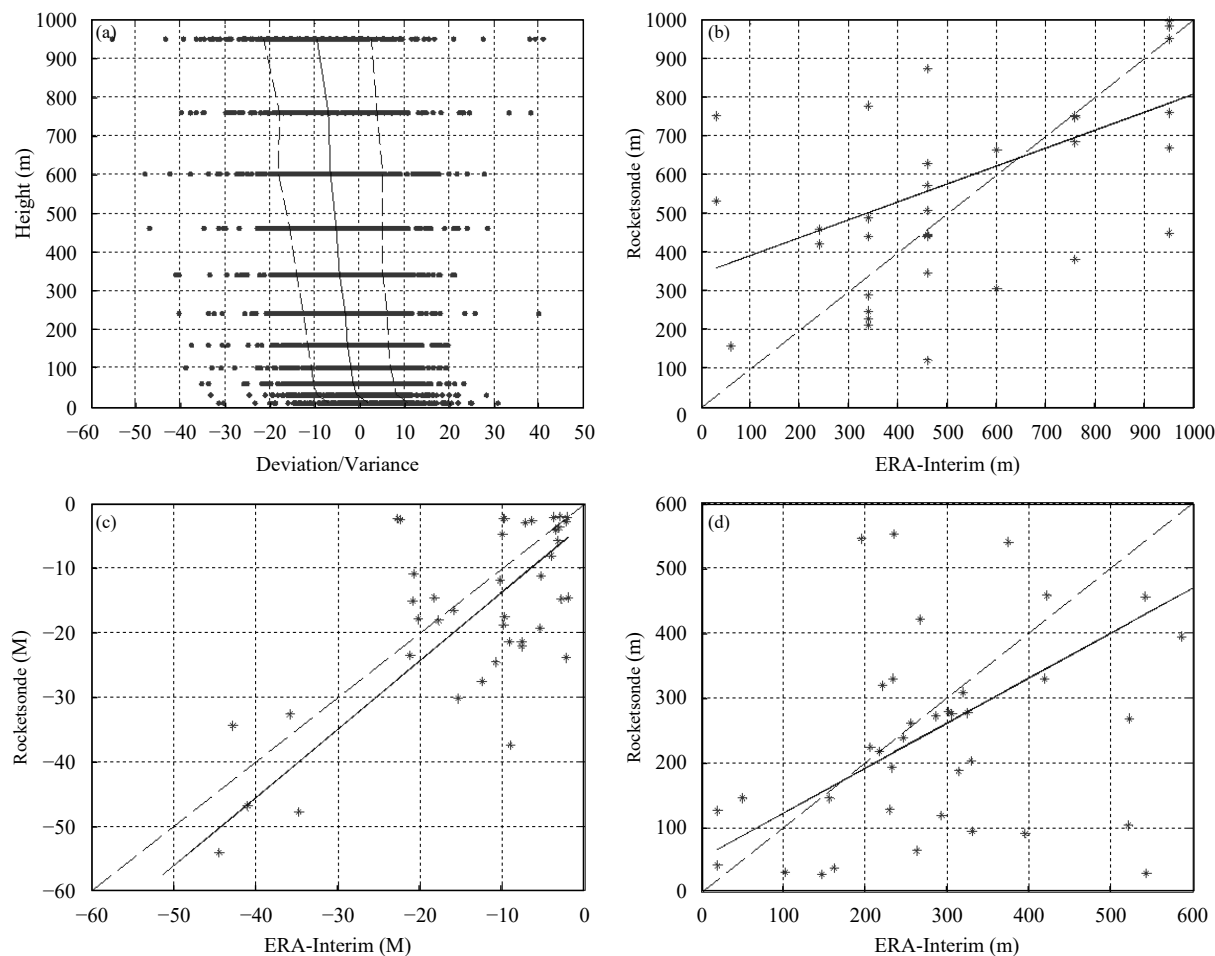


图1 低空探空火箭数据计算的大气波导特征参量值与EID数据计算结果比较 (a. ERA-Interim数据计算大气修正折射率的偏差均值(实线)和均方差(虚线),“•”表示偏差, b. 大气波导顶高, c. 大气波导强度, d. 大气波导厚度)

Fig. 1 Comparison of rocketsonde ducts and the closest ERA-Interim ducts (a. Deviation mean value (solid) and variance (dashed) of atmospheric modified refractivity, b. altitude of ducts, c. magnitude of ducts, d. depth of ducts)

表1 EID计算大气修正折射率偏差均值与方差

Table 1 Deviation mean value and variance of atmospheric modified refractivity

高度(m)	10	30	60	100	160	240	340	460	600	760	950
偏差均值	2.01	-0.56	-1.20	-1.90	-2.50	-3.17	-4.34	-5.20	-6.34	-6.84	-9.3
均方差	8.91	8.91	8.90	8.84	9.01	9.43	9.71	10.37	11.62	10.92	11.95

厚度,这主要是EID垂向分层在240 m高度以上较疏,将会漏掉厚度较薄的大气波导,如图2给出的例子,图2a为2003年4月6日06时某海域两种数据计算大气修正折射率结果,可见在800 m高度附近,出现大气波导,波导强度为-5.3 M,波导顶高度为844.2 m,大气波导厚度为58.2 m,EID在这一层高度分辨率为190 m,致使漏掉了这一层较薄的大气波导。当大气波导厚度大,而且高度比较低时,EID计算大气波导结果与实际吻合较好,如图2b为2003年4月14日06时两种数据计算大气修正

折射率结果,LRD计算大气波导强度为-23.7 M,波导厚度为476.2 m,EID计算大气波导强度为-21.3 M,波导厚度为641.4 m,可见两种数据计算结果吻合较好。

在这357组数据中,LRD出现大气波导332组,说明实际大气波导出现概率为93%。EID出现大气波导82组,计算大气波导出现概率为23%,两者同时出现大气波导有54组。EID出现大气波导时LRD存在大气波导的概率为65.9%,即EID计算存在大气波导,实际存在大气波导的概率为65.9%,

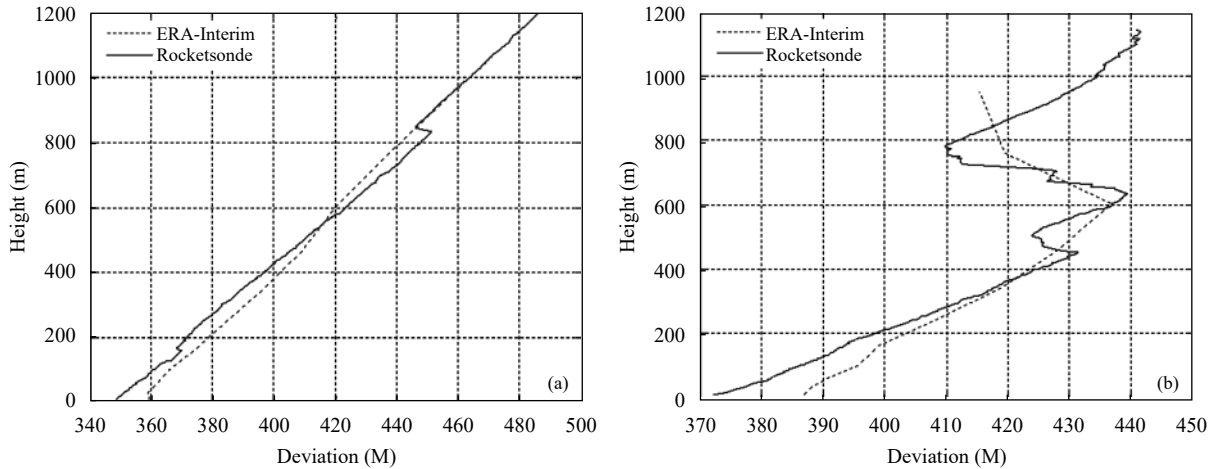


图2 EID 与 LRD 计算的大气波导比较 (a. 2003 年 4 月 6 日 06 时, b. 2003 年 4 月 14 日 06 时)

Fig. 2 Comparison of ducts by rocketsonde and ERA-Interim (a. 06: 00 UTC 6 April 2003, b. 06: 00 UTC 14 April 2003)

因此, 可以利用 EID 统计分析大气波导特征参量值, 其统计的大气波导发生概率要小于实际大气波导发生概率; 其计算的大气波导强度小于实际大气波导强度; 大气波导厚度大于实际大气波导厚度; 大气波导高度在低于 650 m 时, 大气波导高度小于实际大气波导高度, 大气波导高度高于 650 m 时, 大气波导高度大于实际大气波导高度。

4 大气波导发生概率分布

利用 2011—2016 年 6 a 间 EID 全球每天 4 个时次(00、06、12、18 时)的温度、湿度垂向分层数据计算大气波导每个季节的发生概率。由于南北半球的季节差异, 在分析大气波导季节分布时, 用 DJF 季表示 12 月、1 月、2 月(北半球为冬季), MAM 季表示 3—5 月, JJA 季表示 6—8 月, SON 季表示 9—11 月, 方法是: 分别计算 6 a 间每一季节对应月份大气波导的发生概率, 为了体现大气波导发生的季节和地域特点, 将 6 a 每一经纬度网格点上每季度各月的大气波导概率取中值, 得出大气波导概率分布(图 3)。

图 3a 为 MAM 季(北半球春季)大气波导发生概率, 图中白色区域表示无大气波导, 在 MAM 季大气波导高发海区(发生概率 > 50%)主要存在于信风区, 分布在大洋东部, 大陆西部海区, 越靠近大陆的海域大气波导概率越高, 最高可以超过 90%, 其主要是大气平流形成的大气波导, 上述区域是冷洋流影响的海域, 其上为从陆地平流来相对暖干的空气, 从而造成逆温而使垂向上大气湿度锐降, 形成

大气波导。因此, 大气波导发生概率很高。另外还有一个大气波导高发区域为南极的陆地上, 这是由陆地上近地层大气辐射冷却形成的大气波导, 当极地处于极夜时, 陆地上近地层具有强烈的辐射降温现象, 近地层气温很低, 在其上大气形成较强的辐射逆温, 从而形成大气波导。近地层温度越低, 逆温越强, 出现大气波导的概率越高。

该季节大气波导的高发海区主要有 5 个, 分别是: 北太平洋东部海区、南太平洋东部海区、北大西洋东部海区、南大西洋东部海区、北印度洋海区。从图 3a 可见, MAM 季大气波导高发海区北半球的区域大于南半球区域, 而且大气波导发生概率北半球高于南半球, 主要原因是北半球为春季, 在大洋东部和大陆西部的信风带, 地面 2 m 处海上的平均气温明显小于陆地上的平均气温, 在该处, 信风将陆地上的暖干空气输送到冷湿的海面上, 如图 4 所示(图中箭头方向表示风向)易形成较强的逆温层结, 而南半球为秋季, 在大洋东部和大陆西部的信风带, 地面 2 m 处海上平均气温小于陆地上平均气温的情况不显著, 形成的逆温层结不如北半球强。北太平洋高发区(发生概率 > 50%)的范围约为: 15°—30°N, 140°W 至北美大陆西岸, 其南北覆盖范围与加利福尼亚冷流南北覆盖范围大致相同; 南太平洋高发区的范围约为: 10°—30°S, 100°W 至南美大陆西岸, 为秘鲁冷流与东南信风共同作用的区域; 北大西洋高发区的范围约为: 7°—25°N, 40°W 至非洲大陆西岸, 其南北覆盖范围与非洲西部加纳利冷流流经的覆盖范围大体相同; 南大西洋

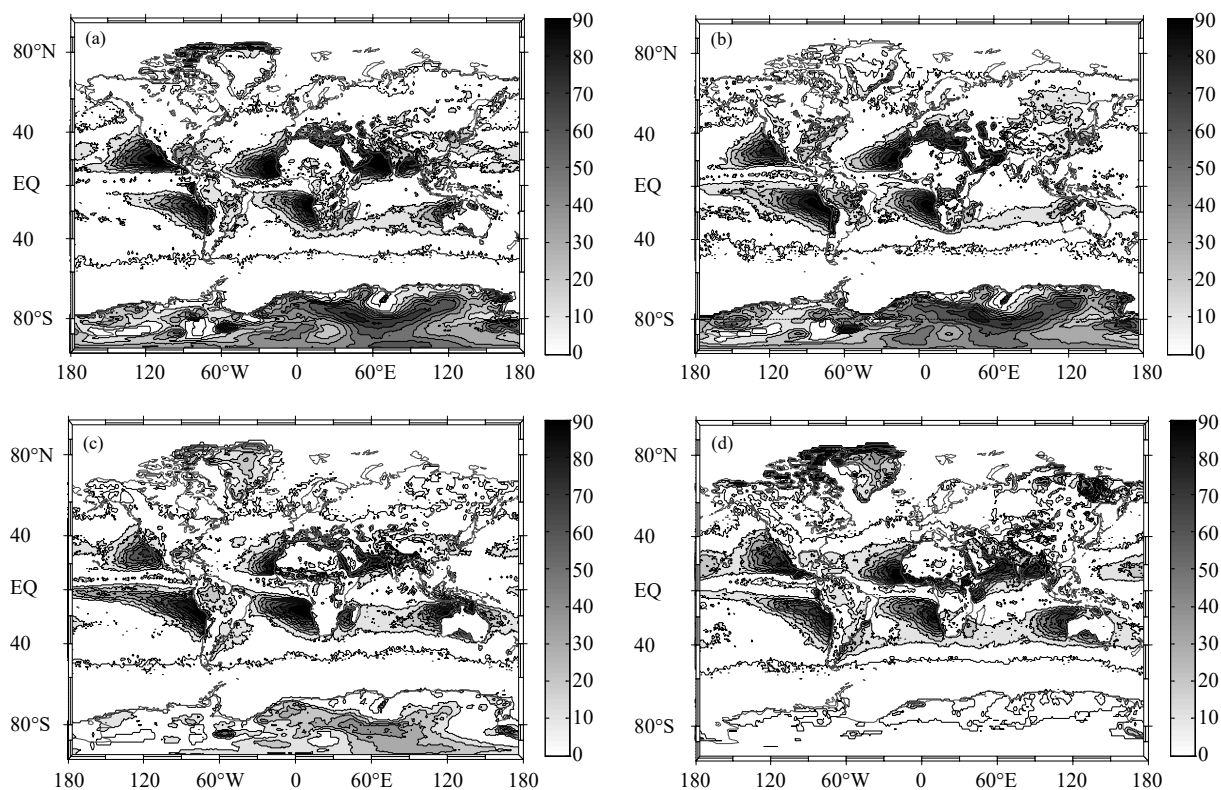


图3 大气波导发生概率(单位:%)的季节分布(a. MAM季, b. JJA季, c. SON季, d. DJF季)

Fig. 3 Ducting probability (unit: %) per season (a. Season MAM, b. Season JJA, c. Season SON, d. Season DJF)

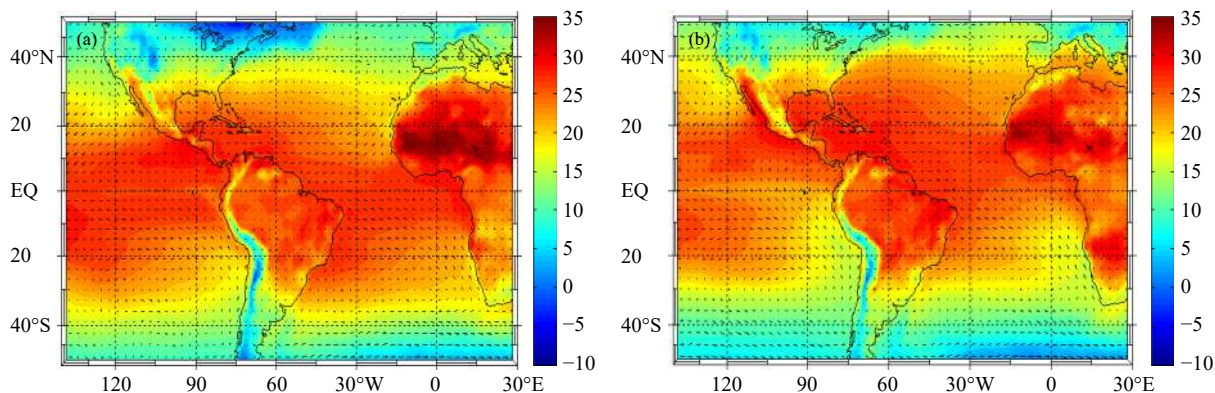


图4 ERA-Interim 表面平均风场(风矢)和地面2 m的平均气温(色阶,单位: °C)(a. 4月, b. 10月)

Fig. 4 Average surface wind (vector) and air temperature (colour, unit: °C) at 2 m from ERA-Interim (a. April, b. October)

高发区的范围约为: 7° — 30° S, 10° W 至非洲大陆西岸, 为本格拉冷流与东南信风共同作用的区域; 印度洋高发区的范围约为 9° N 与亚洲大陆包围的广大区域, 整个阿拉伯海和大部分孟加拉湾为大气波导高发区。太平洋大气波导高发区东西覆盖范围比大西洋大气波导高发区大, 南北覆盖范围小, 这也主要是由冷流流经的区域决定的。

基本无大气波导的海区呈纬向分布, 主要有

3 个带, 分别是北半球中高纬度无大气波导区, 分布在 42° N 以北海域; 南半球中高纬度无大气波导区, 分布在 48° S 以南海域; 热带辐合带无大气波导区, 大致在 0° — 5° N 的部分海域。

JJA 季大气波导发生概率如图 3b 所示, 该季节大气波导的高发区和低发区大体与 MAM 季相同, 但是部分海域发生概率和大气波导高发的区域出现改变。北印度洋大气波导基本消失, 仅在红海、

亚丁湾、波斯湾、阿曼湾等北部海湾大气波导高发。大气波导高发海区北半球区域的发生概率降低,海区减小,南半球的区域发生概率增加,海区增大,南半球区域开始大于北半球区域,各高发区北移,位置到达最北端。北太平洋高发区范围约为: 20° — 35° N, 140° W 至大陆西岸;南太平洋高发区的范围约为: 5° — 30° S, 110° W 至大陆西岸;北大西洋高发区的范围约为: 15° — 40° N, 40° W 至大陆西岸;南大西洋高发区的范围约为: 6° — 25° S, 10° W 至大陆西岸。

基本无大气波导的海区位置北移,总体上到达最北端,北半球中高纬度无大气波导区大体在 48° N 以北;南半球中高纬度无大气波导区在 40° S 以南;热带辐合带无大气波导区大致在 4° — 12° N。

从 SON 季大气波导发生概率分布(图 3c)可知,太平洋和大西洋上的大气波导高发区不变,但是,北半球的高发区范围进一步缩小,概率也进一步降低;南半球的高发区范围进一步扩大,概率也进一步升高,位置开始向南移。印度洋上出现了南印度洋澳大利亚西北部大气波导高发区,此季节,该高发区大体位于 100° E 以东,澳大利亚西北部与爪哇岛之间的海域。北太平洋高发区范围约为: 20° — 35° N, 130° W 至大陆西岸;南太平洋高发区的范围约为: 2° — 32° S, 115° W 至大陆西岸;北大西洋高发区的范围约为: 14° — 28° N, 30° W 至大陆西岸;南大西洋高发区的范围约为: 8° — 28° S, 20° W 至大陆西岸。

基本无大气波导的海区位置总体上开始向南移,北半球中高纬度无大气波导区在 48° N 以北;南半球中高纬度无大气波导区在 48° S 以南;热带辐合带无大气波导区大致在 2° — 10° N。

从 DJF 季大气波导发生概率分布(图 3d)可见,太平洋和大西洋上的大气波导高发区不变,但是,北半球的高发区范围较 SON 季增大,概率增高,南半球的高发区范围较 SON 季减小,概率降低,位置到达最南端。印度洋上出现了两个大气波导高发区,南印度洋澳大利亚西部大气波导高发区依然存在,发生概率有所下降,位置南移,主要位于澳大利亚以西, 100° E 以东海域;北太平洋高发区范围约为: 15° — 32° N, 130° W 至大陆西岸;南太平洋高发区的范围约为: 8° — 32° S, 115° W 至大陆西岸;北大西洋高发区的范围约为: 10° — 24° N, 40° W 至大陆

西岸;南大西洋高发区的范围约为: 10° — 30° S, 20° W 至大陆西岸。

基本无大气波导的海区位置总体上到达最南端,北半球中高纬度无大气波导区在 40° N 以北;南半球中高纬度无大气波导区在 50° S 以南;热带辐合带无大气波导区大致在 0° — 10° N。

5 大气波导强度分布

大气波导强度是大气波导一个重要特征量,大气波导强度越大对电磁波传播的影响就越大,强波导可以造成雷达设备出现探测盲区、增强雷达杂波、增大测高误差等现象,同时,也会造成通信频率大于 30 MHz 的通信信号出现异常(Tang, et al, 2018)。在此用大气波导强度的绝对值表征大气波导的强度,将每一经纬度网格点上每季度各月的大气波导强度取中值,得到大气波导强度的季节变化(图 5)。通过第 2 节可知,由于 EID 垂向分辨率较大,计算的大气波导强度要小于实际情况。

由图 5 可见,大气波导较强区域基本上是大气波导的高发区域,波导发生概率越高,大气波导的强度也就越大。根据大气波导对电磁波传播的影响,将大气波导强度绝对值大于 10 M 视为较强波导,太平洋和大西洋大气波导较强区域的范围和强度呈现的季节变化是:北半球, MAM 季范围最大,其次为 JJA 季、再次为 SON 季, DJF 季范围最小;南半球, SON 季范围最大,其次为 MAM 季和 DJF 季, JJA 季范围最小;北太平洋和北大西洋波导强度由于信风带大陆西部地面气温与大洋东部海面气温温差的原因,大气波导强度极值都是 MAM 季最大,强度 > 30 M, JJA 季其次,约为 28 — 29 M, SON 季最弱,为 19 — 20 M, 此后, DJF 季波导强度开始增强,为 24 — 26 M;南太平洋波导强度的极值存在季节变化,但不如北太平洋明显,各季节极值较为接近, JJA 季最强,约为 19 M, MAM、SON 季其次,为 16 — 18 M, DJF 季最弱,约为 15 M;南大西洋波导强度的极值季节变化强于南太平洋,而小于北太平洋和北大西洋, MAM 季最强,约为 28 M, SON、DJF 季其次,约为 22 M, JJA 季最弱,约为 17 M。南太平洋和南大西洋波导强度的极值较北半球数值要小,这主要是由于南、北半球陆地面积的差异,使得北半球平流逆温强于南半球,导致大气波导强度在太平洋和大西洋上,北半球的强度大于南半球。

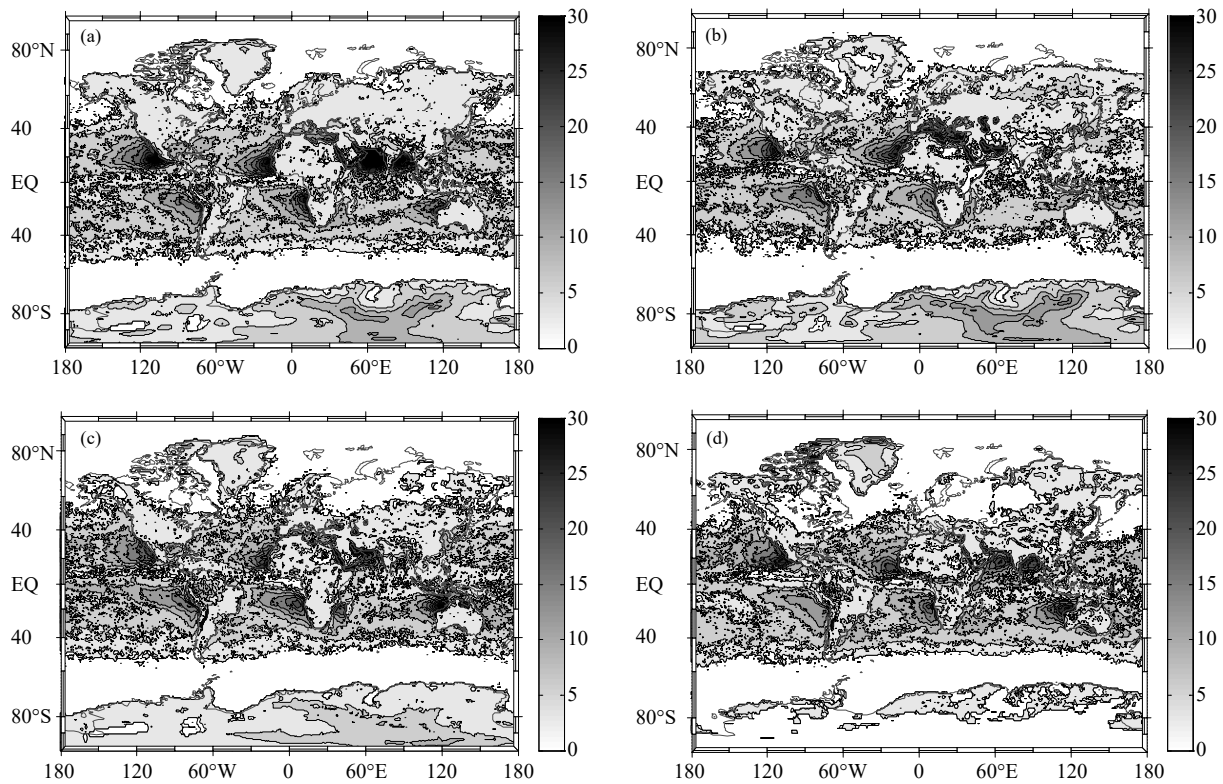


图5 大气波导强度(单位: M)的季节分布 (a. MAM 季, b. JJA 季, c. SON 季, d. DJF 季)

Fig. 5 Magnitude (unit: M) of duct layer per season (a. Season MAM, b. Season JJA, c. Season SON, d. Season DJF)

印度洋的大气波导较强海域与上述两洋存在差异,北印度洋与南印度洋差异也很大,北印度洋大气波导较强海域的范围季节变化是,MAM季面积最大,DJF季其次,SON季范围较小,位于阿拉伯海中部以北海域,JJA季由于存在强劲的夏季风,导致该海域基本没有大气波导,仅在波斯湾、阿曼湾、红海等邻近海域存在大气波导。波导强度极值季节变化与北太平洋和北大西洋相同,也是MAM季最强,但该海域是大气波导极值最强的区域,可达50 M以上,其他季节极值明显减小,DJF、SON季约为22—23 M,JJA季仅在邻近海域有大气波导,极值约为20 M左右;南印度洋大气波导较强海域的范围季节变化是,DJF季面积最大,SON季其次,MAM季再次,JJA季范围较小,波导强度极值SON季最强,约为33 M,DJF季其次,约为31 M,再次为MAM季,约为23 M,JJA季最弱,约为10 M。

6 大气波导高度分布

大气波导高度用大气波导顶部高度来表示,它表示大气波导在垂向上出现的位置,该数值对无线

电波的传播也有重要影响,当无线电收发设备位于大气波导层内或在大气波导层附近时,该无线电设备接收信号才会受大气波导层的影响。将6a每一经纬度网格点上每季度各月的大气波导高度取中值,得到大气波导高度的季节变化(图6)。由第2节可知,EID得到的大气波导高度在650 m以内,其计算的高度值通常小于实际值,当高度超过650 m时,其计算的高度值通常大于实际值。根据对出现大气波导54组LRD的分析,大气波导厚度在中国近海的中值为275 m,当EID的高度大于1680 m时,其垂向分辨率超过300 m,意味着当大气波导高度超过1680 m时,由EID统计计算的数据将会漏掉大多数的大气波导情况。

由图6可见,大气波导高度在信风带靠近大陆西岸海域高度低,随着向西离岸距离增大高度升高,这主要是由于靠近大陆西岸一侧均存在沿岸冷流,当暖干的信风流经冷海面时,形成逆温层,该层湿度存在锐降现象,随着入海距离的增大逆温逐渐减弱,逆温高度层也逐渐升高(Klein, et al, 1993)。大气波导高发区的波导高度季节变化特征是,北半

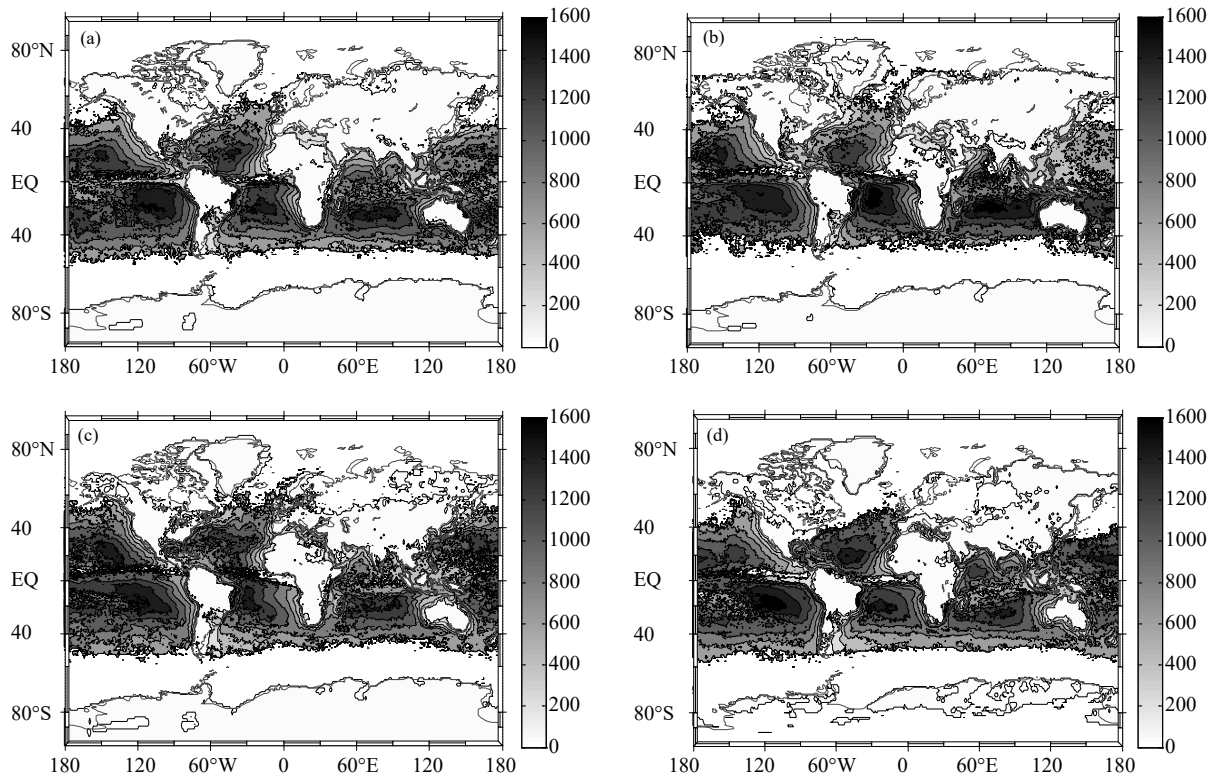


图 6 大气波导顶高度(单位:m)的季节分布(a. MAM 季, b. JJA 季, c. SON 季, d. DJF 季)

Fig. 6 The height (unit: m) of duct top per season (a. Season MAM, b. Season JJA, c. Season SON, d. Season DJF)

球在 SON、DJF 季高度高,波导高度高的区域面积大,在 MAM、JJA 季高度低,波导高度高的区域面积小,南半球在 MAM、JJA 季高度高,波导高度高的区域面积大,在 SON、DJF 季高度低,波导高度高的区域面积小,这与海上边界层高度的变化是一致的(涂静等,2012)。在其他中低纬度近岸海域大气波导高度比较低,如北印度洋的阿拉伯海和孟加拉湾、澳大利亚西北部与爪哇岛之间的海域。在大陆包围的内海中,大气波导高度更低,例如地中海、波斯湾、亚丁湾、红海等海域,即使在波导高度最高的秋季,波导高度一般也不超过 500 m。

7 结 论

通过对比 EID 和 LRD 计算的大气修正折射率和大气波导特征参量值,以及利用 2010—2016 年 EID 采用取各月中值的方法,统计分析全球大气波导特征参量值可得出以下结论:

(1) 可以利用 EID 统计分析大气波导特征参量值,其统计的大气波导发生概率要小于实际大气波导发生概率,大气波导强度小于实际强度,大气波

导厚度大于实际厚度;大气波导顶高在低于 650 m 时,大气波导顶高小于实际高度,大气波导顶高在高于 650 m 时,大气波导顶高大于实际高度。

(2) 大气波导特征参量南北半球分布存在地理和季节差异,总体上大气波导发生概率在 DJF 和 MAM 季,北半球高于南半球, JJA 和 SON 季南半球高于北半球;大气波导强度北半球总体上强于南半球;大气波导高度在信风带靠近大陆西岸海域高度低,随着向西离岸距离增大高度升高,在中、低纬度大陆包围的内海中,大气波导高度最低,大气波导高度北半球总体上低于南半球。大洋东部、大陆西部信风带是大气波导的高发区,大洋上大气波导的高发区(发生概率 > 50%)主要有 6 个,分别是北太平洋海区、南太平洋海区、北大西洋海区、南大西洋海区、北印度洋海区、南印度洋澳大利亚西部海区。

(3) 太平洋和大西洋大气波导高发区的大气波导特征参量的季节变化较为一致,它们的变化特征是:大气波导高发区一年四季都存在, JJA 季位置最北, DJF 季位置最南, MAM 和 SON 季介于其间。北太平洋和北大西洋海区 MAM 季高发区范围最

大, 发生概率最高, SON 季高发区范围最小, 发生概率最低, JJA 和 DJF 季介于 MAM、SON 季之间; MAM 季大气波导较强海域范围最大, 强度最强, SON 季大气波导较强海域范围最小, 强度最弱, JJA 和 DJF 季介于 MAM 和 SON 季之间; 大气波导高度在 MAM、JJA 季高度低, 波导高度高的区域面积小, 在 SON、DJF 季高度高, 波导高度高的区域面积大。南太平洋和南大西洋海区 SON 季高发区范围最大, 发生概率最高, MAM 季高发区范围最小, 发生概率最低, JJA 和 DJF 季介于 MAM、SON 季之间; 南太平洋大气波导强度季节变化不明显, 强度与北太平洋比均较弱, 南大西洋 SON 季大气波导较强海域范围最大, 强度最强, DJF 季大气波导较强海域范围最小, 强度最弱, MAM、JJA 季介于两者之间; 南太平洋和南大西洋海区的大气波导高度在 SON、DJF 季高度低, 波导高度高的区域面积小, 在 MAM、JJA 季高度高, 波导高度高的区域面积大。

(4) 印度洋大气波导高发区大气波导特征参量季节变化特征是: 北印度洋高发区在 MAM、DJF、SON 季存在, JJA 季基本没有大气波导, MAM 季高发区范围最大, 发生概率最高, 可覆盖 10°N 以北的海域, 从 SON 到 DJF 季高发区范围逐渐增大, 发生概率逐渐升高; MAM 季大气波导强度强, 是世界各大洋上大气波导最强的海域, 大气波导较强海域范围大, 可覆盖 10°N 以北的海域, 从 SON 到 DJF 季大气波导强度逐渐增强, 大气波导较强海域范围逐渐增大; 大气波导高度 MAM 季最低, SON 季其次, DJF 季最高。南印度洋澳大利亚西部高发区也在 MAM、DJF、SON 季存在, JJA 季大气波导发生概率较低, DJF 季高发区范围最大, 发生概率最高, 其次为 SON 季, 再次为 MAM 季, JJA 季高发区基本不存在; DJF 季大气波导较强海域范围最大, 强度最强, 其次为 SON 季, 再次为 MAM 季, JJA 季大气波导较强海域范围最小, 强度最弱; 大气波导高度在 SON、DJF 季高度低, 波导高度高的区域面积小, 在 JJA 季高度最高, 波导高度高的区域面积大。

(5) 大气波导低发区或无大气波导海区呈纬带分布, 主要有 3 个, 分别是热带辐合带区、北半球中高纬度区、南半球中高纬度区。这些区的位置具有季节变化, JJA 季位置最北, DJF 季位置最南, MAM、SON 季介于其间。

大气波导分布特征研究需要高分辨率的水平和垂向网格数据, 尤其是边界层内的高分辨率垂向网格数据, 后续将采用未来更高分辨率的再分析数据对大气波导分布特征进行研究, 尤其是分析大气波导的强度、高度和厚度等特征参量的分布, 以及重点海域大气波导的细部分布特征。

致 谢: 感谢欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 提供的 ERA-Interim 再分析分层数据。

参考文献

- 涂静, 张苏平, 程相坤等. 2012. 黄东海大气边界层高度时空变化特征. 中国海洋大学学报, 42(4): 7-18. Tu J, Zhang S P, Cheng X K, et al. 2012. Temporal and spatial variation of atmospheric boundary layer height (ABLH) over the Yellow-East China Sea. Period Ocean Univ China, 42(4): 7-18 (in Chinese)
- Abdul-Jauwad S H, Khan P Z, Halawani T O. 1991. Prediction of radar coverage under anomalous propagation condition for a typical coastal site: A case study. *Radio Sci*, 26(4): 909-919
- Babin S M. 1996. Surface duct height distributions for Wallops Island, Virginia, 1985-1994. *J Appl Meteor*, 35: 86-93
- Bean B R, Dutton E J. 1968. Radio Meteorology. New York: Dover, 435pp
- Brooks I M, Goroch A K, Rogers D P. 1999. Observations of strong surface radar ducts over the Persian Gulf. *J Appl Meteor*, 38(9): 1293-1310
- Cheng Y H, Zhou S Q, Wang D X, et al. 2016. Observed characteristics of atmospheric ducts over the South China Sea in autumn. *Chinese J Ocean Limnol*, 34(3): 619-628
- Craig K H, Hayton T G. 1995. Climatic mapping of refractivity parameters from radiosonde data//Proceeding Conference 567 on Propagation Assessment in Coastal Environments. Bremerhaven, Germany: AGARD-NATO, 1-14
- Dockery G D. 1988. Modeling electromagnetic wave propagation in the troposphere using the parabolic equation. *IEEE Trans Antennas Propag*, 36(10): 1464-1470
- Klein S A, Hartmann D. 1993. The seasonal cycle of low stratiform clouds. *J Climate*, 6(8): 1587-1606
- Mentes S, Kaymaz Z. 2007. Investigation of surface duct conditions over Istanbul, Turkey. *J Appl Meteor Climatol*, 46(3): 318-337
- Patterson W L. 1982. Climatology of marine atmospheric refractive effects. A compendium of the Integrated Refractive Effects Predictions System (IREPS) historical summaries. Naval Ocean Systems Center (NOSC) Tech. Doc. 573. NOSC, San Diego CA, 1982: 1-522
- Tang H C, Wang H, Jiao L, et al. 2018. Analysis of ultra-short wave propagation in atmospheric duct//Proceedings of the 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. Hangzhou, China: IEEE
- Turton J D, Bennetts D A, Farmer S F G. 1988. An introduction to radio ducting. *Meteor Mag*, 117(1393): 245-254
- von Engeln A, Teixeira J. 2004. A ducting climatology derived from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts global analysis fields. *J Geophys Res: Atmos*, 109(D18): D18104
- Zhu M, Atkinson B W. 2005. Simulated climatology of atmospheric ducts over the Persian Gulf. *Bound Layer Meteor*, 115(3): 433-452