



COSMIC 与 ERA-Interim 折射率数据分析 海洋边界层时空分布的对比

摘要

本文基于小波协方差变换法,使用 COSMIC 和 ERA-Interim 两种数据的折射率获取了全球海洋边界层的时空分布情况并进行了对比分析.结果表明:在空间上,由两种数据反演出的海洋边界层高度所显示出的分布特征大致相同,即沿着赤道呈不完全对称分布,仅在个别海域有所差别;在季节及月变化方面,两者均呈现出夏季较高的特点;在日变化特征上,两者变化均不明显,但 ERA-Interim 数据的海洋边界层高度的日变化特征与太阳辐射的日变化特征更加符合;在数值差异上, COSMIC 数据要比 ERA-Interim 数据的结果高 500~1 000 m,且低纬度地区两者差异大于高纬度地区,夏季两者差异小于冬季.

关键词

COSMIC 掩星; ERA-Interim; 折射率; 海洋边界层; 小波协方差变换法; 时空分布特征

中图分类号 P407

文献标志码 A

收稿日期 2021-07-08

资助项目 南京信息工程大学人才启动经费(2018r074); 新罗区奇迈科技创新基金(XLQM004)

作者简介

袁帅,男,硕士生,主要研究方向为 GNSS 气象学.1402303629@qq.com

唐歌实(通信作者),男,博士,教授,主要研究方向为 GNSS 大气遥感.tanggeshi@nuist.edu.cn

0 引言

大气边界层是地球大气中的物质、能量与动量上下交换的过渡层,对全球气候系统有着重要的影响^[1].大气边界层高度是描述大气边界层特征的一个关键参数,可以用来描述给定区域内与之相关的昼夜、气象和气候过程,包括云特征以及地面和自由大气之间的联系^[2],可靠的边界层高度信息对于天气预报和气候模式等研究有着重要的意义^[3].

长期以来,边界层高度的测量主要依靠无线电探空数据、星载遥感、雷达观测资料等.但这些传统的探测方法都有其局限性:无线电探空资料的地理分布有限,尤其是海上的站点更少,且每天只有两次观测数据,难以用来研究大范围的边界层高度;星载遥感资料虽然探测范围广,但对于边界层研究来说其垂直分辨率较低^[4],并且星载遥感资料受天气条件影响较大,仅在多云和晴空条件下有着较好的探测效果^[5];雷达观测资料的观测结果容易受到平流输送^[6]和环境噪声的影响^[7]且观测的分辨率有限^[8],也同样存在探测范围较小的问题.

目前,对于大范围的海洋边界层高度的研究,通常使用全球导航卫星系统无线电掩星(Global Navigation Satellite System Radio Occultation, GNSS/RO)观测资料和再分析资料. GNSS 无线电掩星技术是一种全新的大气廓线探测手段,具有高精度、高垂直分辨率、近实时、全天候、全球覆盖、低成本、长期稳定性等优点.以 COSMIC 为代表的掩星观测卫星在采用了“开环跟踪”技术后,有效解决了大气多径效应的影响,大大提高了低空的探测精度.廖麒翔等^[9]、刘艳等^[10]相继使用 COSMIC 折射率数据进行了边界层高度的研究,取得了很好的结果.再分析资料是利用数值天气预报资料同化系统给出的过去几十年具有高度一致性的全球客观资料,可以视为对大气情况的“最优”反映,目前已成为一种最主要的资料来源. ECMWF 再分析(ECMWF Re-Analysis)资料由欧洲中期天气预报中心发布,具有准确、可信度高等优点,被广泛地运用于气象等领域, von Engel 等^[1]就使用 ECMWF 再分析资料中的 ERA-Interim 数据获取了大气边界层高度. Guo 等^[11]、周文等^[12]分别探讨了两种资料在使用相同方法下获取边界层高度的计算结果,但前者对于两种数据获取的边界层高度结果未深

1 南京信息工程大学 遥感与测绘工程学院, 南京, 210044

2 龙岩学院 资源工程学院, 龙岩, 364012

入到对时空分布进行比较,而后者的研究区域则局限于青藏高原地区.本文基于小波协方差方法,使用2008—2012年5年的COSMIC数据和ERA-Interim数据分析了海洋边界层高度的时空分布特征,并详细比较了两种数据获取的海洋边界层高度在空间分布、季节、月变化及日变化方面的数值差异.

1 数据与方法

1.1 数据源

本文中的COSMIC折射率数据来自于COSMIC数据分析与处理中心发布的wetPrf文件(<http://cosmic-io.cosmic.ucar.edu/cdaac/index.html>). wetPrf文件中包含折射率、温度、气压、水汽分压等廓线数据,折射率廓线的高度范围约0~40 km,垂直分辨率为0.1 km.选取2008—2012年共计5年的数据.

ERA-Interim数据由欧洲中期天气预报中心发布(<https://apps.ecmwf.int/datasets/data>). 选择的数据为数据集中的压强等级数据,需要的参数为位势、比湿和温度参数.该数据集每天只在UTC时间的0时、6时、12时和18时有数据,空间上以最大 $3^\circ \times 3^\circ$ 、最小 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 的格网形式给出.

1.2 ERA-Interim 折射率的计算

ERA-Interim资料中没有直接提供折射率数据,需要通过再分析资料中的比湿、气压和温度3个参数计算获取.首先通过比湿、气压计算水汽压,计算公式如下:

$$e = \frac{Pq}{\varepsilon + (1 - \varepsilon)q}, \quad (1)$$

式中: P 为大气压强,单位hPa; ε 为干湿空气气体常数的比值, $\varepsilon \approx 0.622$; q 为比湿,单位 $g \cdot kg^{-1}$; e 为水汽压,单位hPa.

再由水汽压、气压和温度进一步计算折射率,计算公式如下:

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2}, \quad (2)$$

式中: N 为大气折射率; e 为式(1)中求得的水汽压,单位hPa; P 为大气压强,单位hPa; T 为大气绝对温度,单位为K.

此外,ERA-Interim资料中没有海拔高度参数,需要通过位势变量计算获取,先通过位势计算位势高度:

$$h_{gp} = \frac{z}{g} / 1\,000, \quad (3)$$

式中: z 为位势,单位 $m^2 \cdot s^{-2}$; g 为ERA-Interim默认计算位势的重力加速度,数值大小为9.8,单位为 $m \cdot s^{-2}$; h_{gp} 为位势高度,单位为km.

再通过位势高度计算海拔高度.先计算数据点处所对应的地球半径(单位为km):

$$R_e(\varphi) = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\cos^2(\varphi)}{6\,378.137\,2} + \frac{\sin^2(\varphi)}{6\,356.752\,2}\right)}}, \quad (4)$$

式中, φ 为数据点所对应纬度.

$$H_{gm} = 9.806\,65 h_{gp} R_e(\varphi) \times 9.806\,16 \times [1 - 0.002\,637 \cos(2\varphi) + 0.000\,005\,9 \cos^2(2\varphi)]^{-1} \times (R_e(\varphi) - h_{gp})^{-1}, \quad (5)$$

其中, H_{gm} 表示海拔高度, h_{gp} 表示位势高度,单位均为km.

1.3 边界层高度确定方法

使用大气折射率反演边界层高度的基本原理为边界层顶附近的温度和湿度等气象要素在垂直方向上往往存在着剧烈的变化,因而导致折射率在边界层顶附近突然减小.本文确定边界层高度的方法为小波协方差变换法,该方法最早由Gamage等^[13]在1993年提出,是一种用来检测突变的方法,后来被用于从折射率数据中反演边界层,并验证了其有效性和准确性^[14-16].首先定义Haar函数:

$$h\left(\frac{z-b}{a}\right) = \begin{cases} +1, & b - \frac{a}{2} \leq z \leq b, \\ -1, & b \leq z \leq b + \frac{a}{2}, \\ 0, & \text{其他}, \end{cases} \quad (6)$$

式中: z 是高度; b 是Haar函数的中心位置; a 是尺度因子.

Haar函数的协方差变换函数 W_f 定义如下:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{a} \int_{Z_b}^{Z_a} f(z) h\left(\frac{z-b}{a}\right) dz, \quad (7)$$

式中 $f(z)$ 是待分析的折射率廓线, Z_a 和 Z_b 分别是折射率廓线的上下限.当尺度因子 a 取定值时,若 $W_f(a, b)$ 在 $b = b_0$ 处取最大值,则意味着 $f(z)$ 在此处有大的阶跃,便认为这时相对应的高度是边界层高度.当 a 取0.4 km时为最优解^[14-15],因此本文也选择 a 为0.4 km.边界层高度具体的计算步骤如下:

1) 筛选廓线:为了保证选定的廓线包含边界层的有效信息并有足够的样本数,选取数据的下界最低有效记录高度在距离海平面1 km^[12,17].计算所有廓线折射率的双权重平均值和标准差,设定平均值

加(减)3 倍标准差的廓线为上(下)阈值,删除超出阈值范围的廓线。

2) 设置边界层高度的阈值:边界层高度一般位于几百米到 2 km 范围内,2 km 以上有分布,但很少超过 5 km,因此本文把边界层高度的阈值设置为 5 km。

3) 插值:将掩星折射率廓线以 10 m 为间隔进行插值,插值方法选择 3 次样条插值法。

4) 协方差函数值的计算:在每个高度上取 $a = 0.4$ km 计算协方差函数的值。

$$W_f(a, b)_i = \frac{1}{40} \left[\sum_{k=1}^{20} N(i-k) - \sum_{k=1}^{20} N(i+k) \right]. \quad (8)$$

5) 确定边界层高度: $W_f(a, b)$ 取最大值时 b_0 所对应的值即为边界层顶高度。

图 1 给出了使用 COSMIC 折射率和 ERA-Interim 折射率确定边界层高度的例子,图 1a、图 1b 中红色虚线分别表示 COSMIC 折射率和 ERA-Interim 折射率,蓝色实线为求得的折射率的协方差函数值,横线为确定的边界层高度值。图 1a 掩星事件发生时间为 2008 年 1 月 1 日 0 时 7 分 53 秒,发生的地点为 63.63°E,55.42°N;图 1b 中 ERA-Interim 网格数据点的经纬度为 64°E,56°N,时间为 2008 年 1 月 1 日 0 时。由图 1 可知,小波协方差变换法可以从 COSMIC 和 ERA-Interim 折射率中计算出边界层高度,由 COSMIC 折射率求得的边界层高度要比 ERA-Interim 折射率所求解的高 1 km 左右。COSMIC 掩星数据和 ERA-Interim 数据的获得原理是不同的,ERA-Interim

数据模式系统性偏低,这可能是导致两者计算边界层产生差异的主要原因。

1.4 海洋边界层结构分析方法

由于使用的 ERA-Interim 数据为 $2^\circ \times 2^\circ$ 的网格数据,而掩星数据点的经纬度是全球分布的,因此处理掩星数据时,将全球分为 90×180 个 $2^\circ \times 2^\circ$ 的网格单元,计算每个单元内大气边界层高度的年平均值、月平均值以及小时的平均值作为该网格单元的替代值,使得 COSMIC 数据与 ERA-Interim 数据保持形式上的一致。

2 海洋边界层时空分布特征

2.1 海洋边界层空间分布特征

图 2 为 2008—2012 年 5 年的 COSMIC 折射率数据及 ERA-Interim 折射率数据所确定的海洋边界层平均高度的全球分布情况。COSMIC 数据显示在 45°N 以北的北冰洋及附近海域以及 45°S 以南的海域有着较低的边界层高度,约在 1~1.5 km 范围内,部分地方甚至低于 1 km; ERA-Interim 则显示 50°N 以北及 60°S 以南有着较低的边界层高度,在 1 km 以下。在南北美洲以及非洲西岸等大陆西海岸地区,两者均对应着较低的边界层高度, COSMIC 在 1~1.5 km 范围内,而 ERA-Interim 数据则在 1 km 以下。在孟加拉湾到中国南海再到爪哇海、西里伯斯海及班达海等印度尼西亚附近海域,同样对应着较低的边界层高度, COSMIC 在 1~1.5 km 范围内, ERA-Interim 数据则在 1 km 以下。除去上述海域,在 COSMIC 边界层

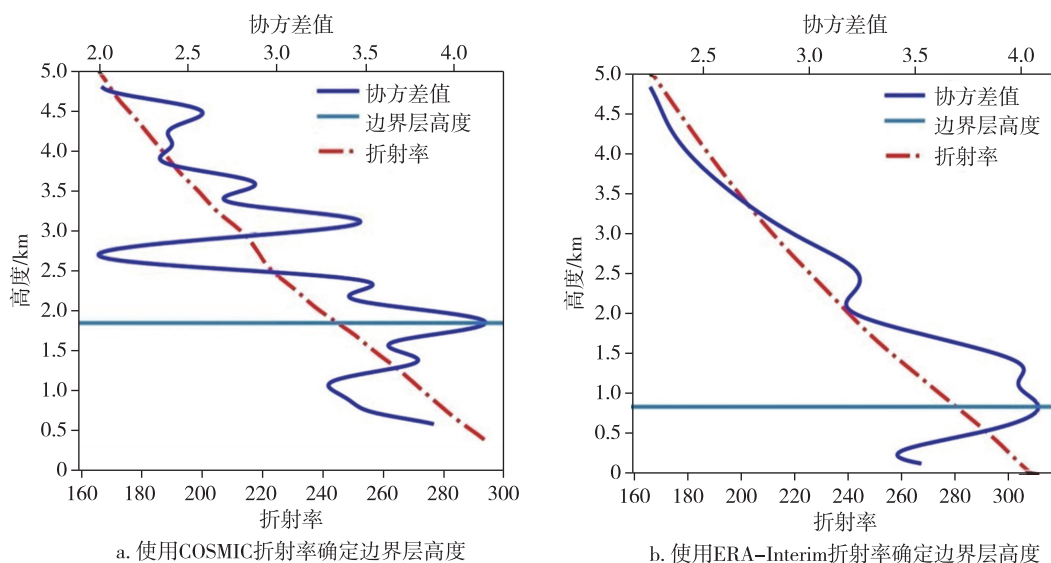


图 1 使用 COSMIC 和 ERA-Interim 折射率确定边界层高度

Fig. 1 Determination of boundary layer height using COSMIC and ERA-Interim refractive index

45°N~45°S 海域有着较高的边界层高度,在 1.5~2 km 范围内,在南太平洋东部、北太平洋中东部、南美洲西岸及印度洋南部部分海域,甚至达到了 2~2.5 km;ERA-Interim 数据则在 50°N~50°S 海域有着 1~1.5 km 的边界层高度,在南太平洋东部、北太平洋中东部、南美洲西岸及印度洋南部部分海域的边界层高度则在 1.5~2 km 范围内.整体而言,两者有大致相同的分布情况,在忽略陆地分布的影响下,海洋边界层高度大致呈现出沿着赤道为轴的不严格纬向对称分布.由 ERA-Interim 数据确定的边界层高度要比 COSMIC 所确定的低 0.5~1 km 左右,一方面与 ERA-Interim 模式系统性偏低相关,另一方面则是因为 ERA-Interim 中的边界层高度包含夜间稳定边界层和混合边界层,而 COSMIC 数据由于探测最低高度有限只能检测混合层高度,只有少部分廓线能检测到夜间稳定边界层高度^[12].

图 3a、图 3b 分别为由 COSMIC 和 ERA-Interim 数据确定的海洋边界层高度的发生频率统计结果,横坐标为边界层高度区间,纵坐标为频率.

由图 3 可知: COSMIC 边界层 1.4~1.6 km 的占比最多,约 25.7%, ERA-Interim 边界层 1.0~1.2 km 的占比最多,约 26.8%;由 COSMIC 确定的边界层高度大多位于 1.2~1.8 km 范围内,占比超过 70%,而 ERA-Interim 在 0.6~1.4 km 范围内占比达 85%左右; COSMIC 边界层高度在 1 km 以下的只占 3.4%,而 ERA-Interim 边界层高度在 1 km 以下占比则高达 34.9%;在边界层高度大于 1.6 km 的范围内, COSMIC 的占比达 33.8%,而 ERA-Interim 则低于 3%.此统计结果的差异与上文由 ERA-Interim 数据确定的边界层高度要比 COSMIC 所确定的低 0.5~1 km 左右的现象相符合.

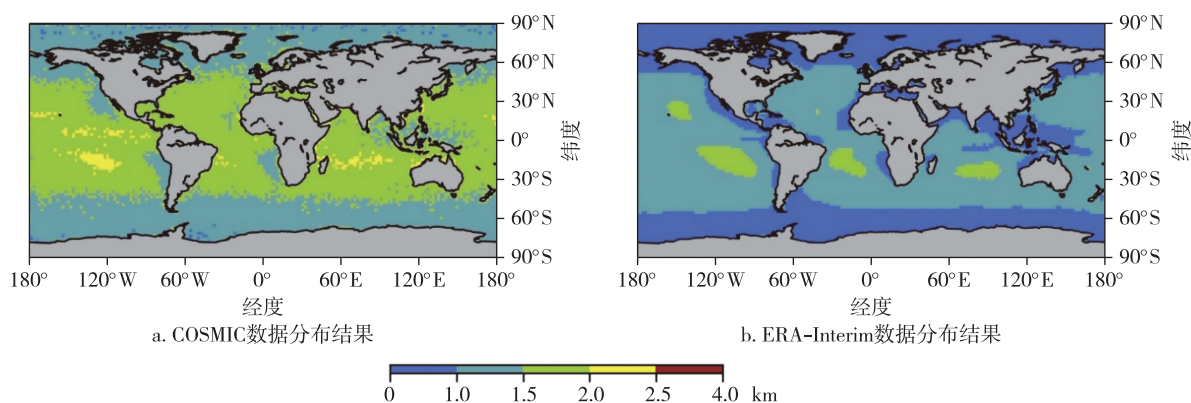


图2 使用2008—2012年COSMIC和ERA-Interim折射率确定海洋边界层的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of oceanic boundary layer determined by using COSMIC and ERA-Interim refractive indices from 2008 to 2012

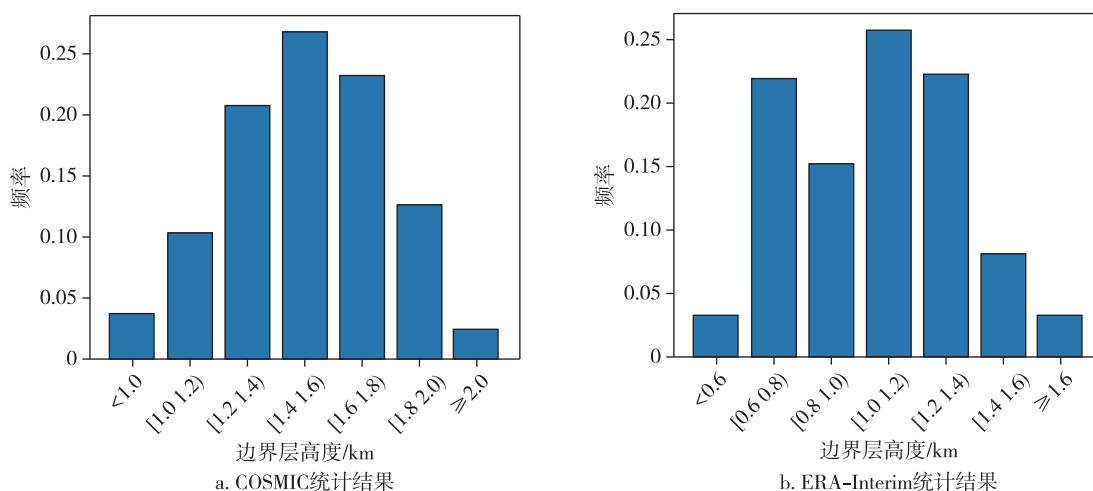


图3 使用2008—2012年COSMIC和ERA-Interim折射率确定海洋边界层高度分布的频率统计结果

Fig. 3 Frequency statistics of determining oceanic boundary layer height using COSMIC and ERA-Interim refractive indices from 2008 to 2012

将全球海域分为 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 、 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 、 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{S}$ 、 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{S}$ 和 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{S}$ 共 6 个纬度带对 COSMIC 数据和 ERA-Interim 数据所确定的边界层高度做出差异分析.图 4a 给出了 COSMIC 数据和 ERA-Interim 数据在这 6 个纬度带的边界层高度的平均值, COSMIC 分别为 1.18、1.58、1.74、1.77、1.48 和 1.16 km,而 ERA-Interim 分别为 0.80、1.13、1.19、1.31、1.09 和 0.82 km.两种数据所确定的海洋边界层高度平均值最大的区域均位于 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, 平均值最小的情况, COSMIC 位于 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{S}$, ERA-Interim 位于 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$.图 4b 为 COSMIC 数据和 ERA-Interim 数据在这 6 个纬度带的边界层高度的平均值的差异情况,差值最大为 0.55 km,位于 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, 最小差值为 0.34 km,位于 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{S}$.总体来看,在南北半球, COSMIC 数据和 ERA-Interim 数据边界层高度平均值随着纬度的增加而减小,在低纬度地区两种数据的差异要大于高纬度地区.

2.2 海洋边界层的季节及月变化特征

图 5 为 2008—2012 年海洋边界层高度的季节分布,可以看出海洋边界层高度有着明显的季节变化特征.对于 COSMIC 数据,在北半球夏季时有着较高的边界层高度,南半球则在冬季时有着较高的边界层高度,这一现象在 $30^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 及 $30^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{S}$ 的广大区域更加明显.例如在北冰洋地区部分海域冬春季节边界层高度低于 1 km,这是因为夏季时海冰密度小,海温较高,产生湍流动能,有利于加深边界层,而 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{S}$ 的海域则正好相反,在夏秋季节的边界层高度明显低于春冬两季.对于 ERA-Interim 数据,没有显示出数值

上的改变,但仍可以发现,夏季北半球高纬度边界层低于 1 km 的区域有明显的向北缩减的趋势,在印度和阿拉伯半岛之间的海域以及加拿大纽芬兰附近的海域也有着明显的边界层高度的增加.南太平洋东部、南美洲东部、澳大利亚东部的南印度洋海域以及美国以北的太平洋东部海域由于常年位于信风区,受四季变化影响较小,对应着较高的边界层.在北美洲西海岸地区、南美洲西海岸、 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{S}$ 的非洲西海岸这些盛行层状云地区,同样受四季影响较小,常年有着较低的边界层.在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 的亚洲东海岸、西太平洋地区,边界层顶呈现出明显的夏低冬高的现象, Klein 等^[18]认为该地区冬季受寒潮或 Hardly 环流产生的层积云影响,因此冬季边界层较高,而夏季该地区台风频发是其边界层较低的原因^[11];墨西哥湾地区由于夏季飓风频发,边界层较低,但冬季受到极地寒流向赤道移动和海上锋面的影响^[1,19],所以边界层较高.在 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 的北大西洋海域边界层高度全年偏高,和廖麒麟等^[9]所得到的情况相同.孟加拉湾到中国南海再到爪哇海、西里伯斯海及班达海等印度尼西亚附近等赤道暖池海域,常年降水丰富,长波辐射被用于水汽蒸发,导致边界层内对流能量减少,四季都有着较低的边界层高度.总的来说, COSMIC 数据和 ERA-Interim 数据所确定的海洋边界层的四季分布大体一致,只在个别区域有差异.比如: ERA-Interim 数据中,地中海地区的边界层顶在冬季明显偏高,而 COSMIC 数据则没有这种现象;在非洲以东佛得角海域, COSMIC 数据仅仅在夏季呈现出较低的边界层高度,而 ERA-Interim 数据中该地区全年都对对应着较低的边界层高度.

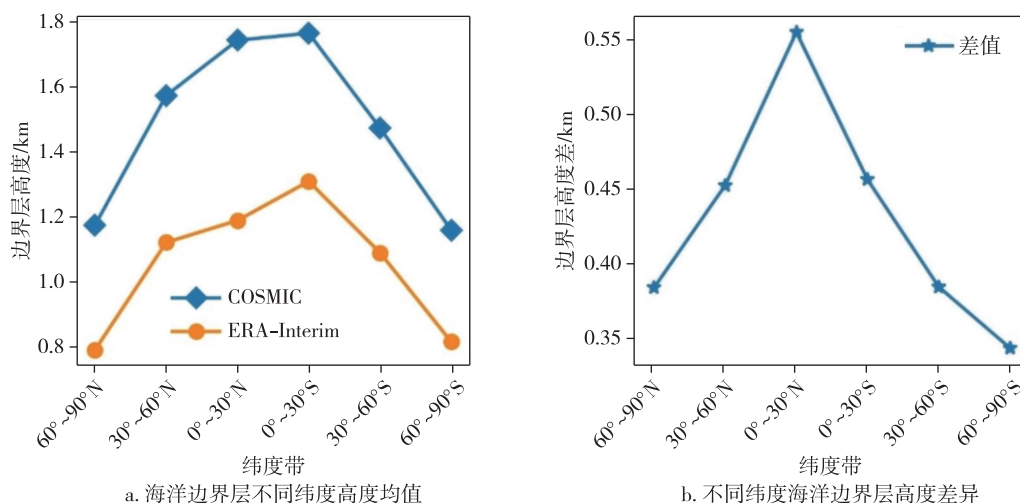


图 4 COSMIC 和 ERA-Interim 折射率确定海洋边界层高度在不同纬度带的均值及其差异

Fig. 4 Means of oceanic boundary layer height at different latitudes determined by COSMIC and ERA-Interim refractive index, and differences between the two datasets

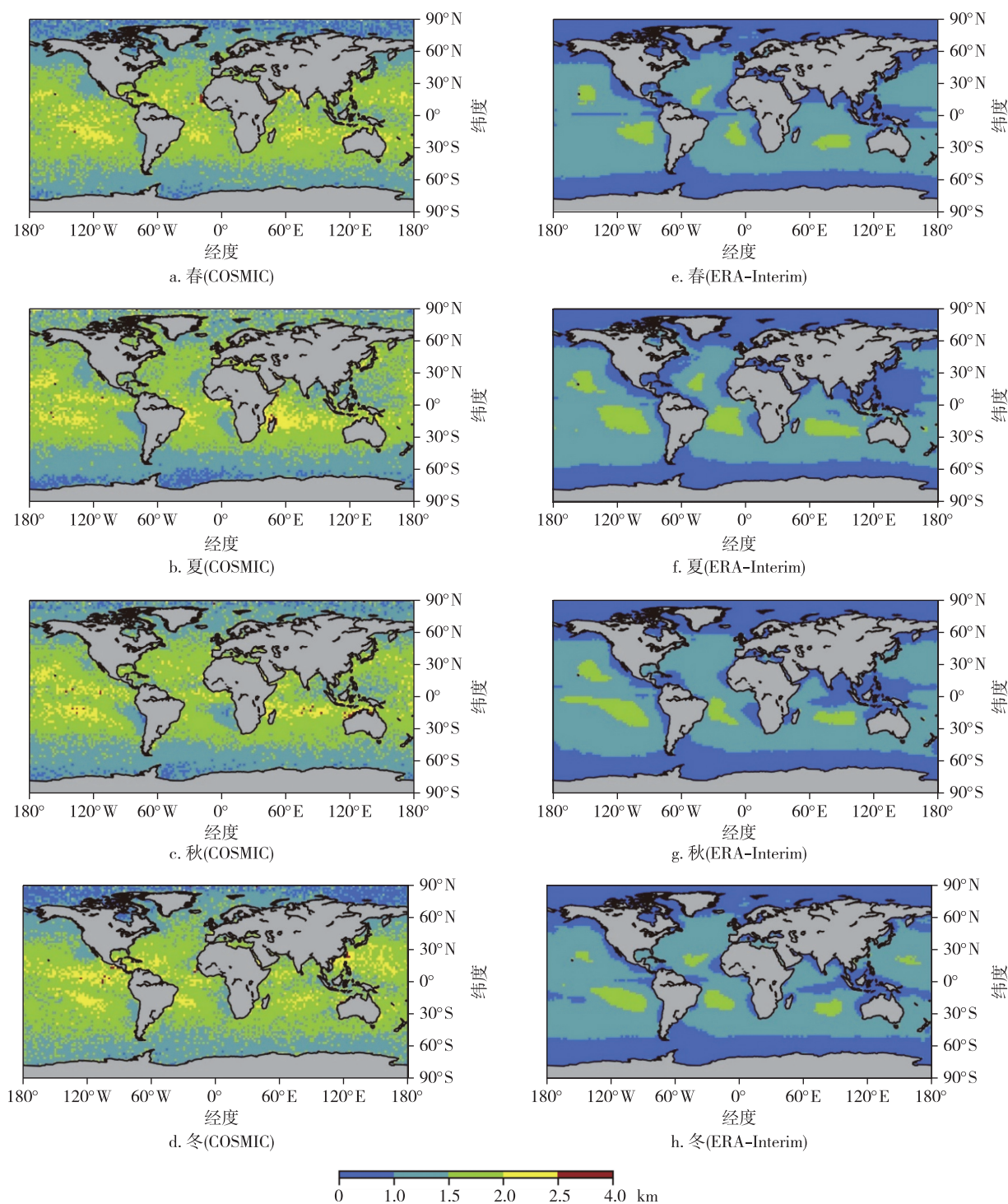
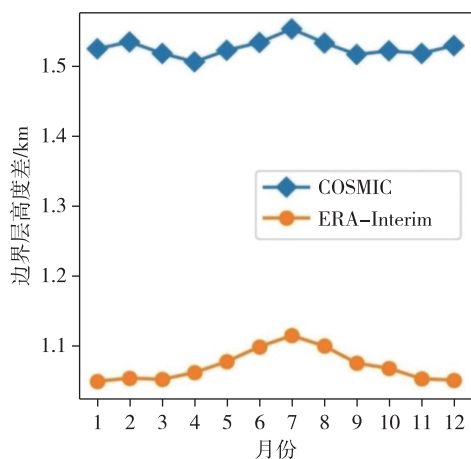


图5 2008—2012年COSMIC和ERA-Interim折射率确定海洋边界层高度季节平均值

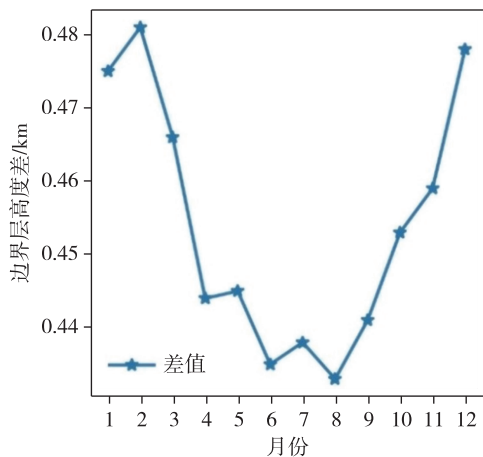
Fig.5 Seasonal averages of oceanic boundary layer height determined by COMIC and ERA-Interim refractive index from 2008 to 2012

图6为对COSMIC和ERA-Interim折射率所确定的海洋边界层的月平均高度的统计.图6a中蓝线为COSMIC折射率海洋边界层月平均高度,橙线为ERA-Interim折射率海洋边界层月平均高度,可以看出COSMIC的1—12月的月均高度均保持在1.5 km

左右,其中7月最高,达到1.55 km,4月最低为1.50 km,最大值与最小值相差50 m.在徐晓华等^[15]的研究中,1—12月中月均边界层高度的最大值与最小值相差100 m左右,但其统计的区域包括陆地,而由于海洋热容量较大及海洋上空云层对太阳短波辐射



a. 海洋边界层高度月平均值



b. 海洋边界层高度月差异

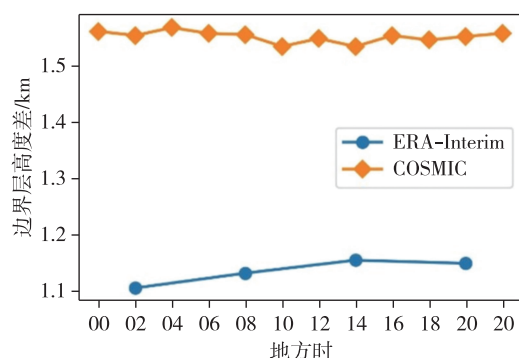
图6 2008—2012年COSMIC和ERA-Interim折射率
确定海洋边界层高度月平均值及其差异Fig. 6 Monthly averages of oceanic boundary layer height
determined by COSMIC and ERA-Interim refractive index from
2008 to 2012 and monthly differences between the two datasets

的反射,海洋的边界层高度月变化幅度要小于陆地. ERA-Interim 数据也在7月取得最大值,为 1.11 km,最小值在1月,为 1.04 km.由图 6a 可知,海洋边界层的月平均高度存在夏季月份较高、冬季月份较小的情况.图 6b 为 COSMIC 和 ERA-Interim 数据海洋边界层月平均高度的差值情况,8月两者差值最小,为 0.43 km,在2月差值最大,为 0.48 km,夏季6—8月差值明显小于冬季(12月至次年2月).

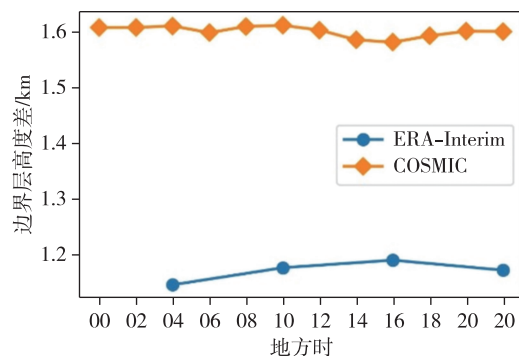
2.3 海洋边界层日变化特点

在研究海洋边界层日变化时,由于 ERA-Interim 数据每天只有4个时刻的数据,所以需要选择特定时区的海域进行研究.本文将包含太平洋中部及部分北冰洋的西十区海域($142.5^{\circ}\sim 157.5^{\circ}\text{W}$)记为区

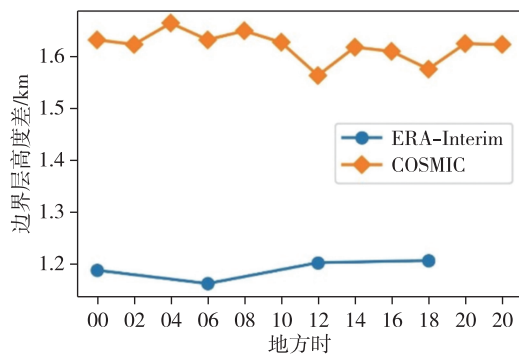
域A、大西洋中部及部分北冰洋的西二区海域($22.5^{\circ}\sim 37.5^{\circ}\text{W}$)记为区域B、位于印度洋中部的海域($82.5^{\circ}\sim 97.5^{\circ}\text{E}$)记为区域C,将这3个海区作为典型的研究区域.在研究时,需要将 COSMIC 和 ERA-Interim 中 UTC 时间转化为当地时间,对于 ERA-Interim 数据来说,每天只有4个时刻,而对于 COSMIC 数据,取前后2h的平均值作为某时刻的值.图7为以上3个海域的年平均边界层高度的日变化曲线,橙线为 COSMIC 的结果、蓝线为 ERA-Interim 的结果.一般来说,由于太阳辐射的影响,在14时左右海



a. A海域日变化趋势



b. B海域日变化趋势



c. C海域日变化趋势

图7 2008—2012年COSMIC和ERA-Interim折射率
确定海洋边界层高度的日变化趋势Fig. 7 Daily variation trends of oceanic boundary layer
height determined by COSMIC and ERA-Interim
refractive index from 2008 to 2012

面温度达到最高值时,边界层的高度会达到最高值,但图7中显示在A、B两个海域边界层高度全天变化较小,C海域变化较大,14时左右的边界层高度也并不是最高,说明COSMIC数据确定的边界层高度的日变化特征与太阳辐射的日变化特征符合程度较低,除与COSMIC数据本身性质相关外,也与海水比热容较大、海温日较差较小和不同海域云的影响有关。相比较而言,ERA-Interim所得到平均边界层高度的日变化在数值上要比COSMIC所得到的要低400~500 m,但也加更符合太阳辐射的特征,例如图7a、7b和7c中分别在14、16和12时取得最大值。COSMIC数据和ERA-Interim数据所得到的海洋边界层高度的日变化均较小,一般只有几十米,这与其他研究者的结论相符合^[9-10,15]。

3 结论

本文分别采用2008—2012年的COSMIC折射率数据和ERA-Interim折射率数据,分析了全球海洋边界层的空间分布特征、季节及月变化特征和日变化特征,并比较了两种数据所得到的海洋边界层变化特征的数值差异,得到如下结论:

1)两种数据均显示,海洋边界层顶有明显的空间分布特征。全球海洋边界层高度大致呈现出沿着赤道为轴的不严格纬向对称分布,边界层高度随着纬度的增加而降低,副热带地区的边界层高度的几个高值区与副热带系统位置较为一致。两种数据所获取的海洋边界层在数值分布上存在差异,COSMIC数据要比ERA-Interim数据高500 m左右,且在高纬度地区两者差异大于低纬度地区。

2)在海洋边界层的季节以及月变化特征方面,两种数据大致相同,只在少数地区存在差异。两种数据所得海洋边界层平均高度均存在夏高冬低的现象,且两者之间的差异则显示出夏低冬高的现象。

3)两种数据均显示,海洋边界层顶的日变化特征不明显,一般只有几十米。COSMIC数据要比ERA-Interim数据高500 m左右,ERA-Interim数据确定的边界层高度的日变化特征与太阳辐射的日变化特征更加符合。

参考文献

References

[1] von Engel A, Teixeira J. A planetary boundary layer height climatology derived from ECMWF reanalysis data [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(17): 6575-6590

[2] Ao C O, Waliser D E, Chan S K, et al. Planetary boundary layer heights from GPS radio occultation refractivity and humidity profiles [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D16): D16117

[3] 郭鹏, 严豪健. COSMIC/GPS 掩星资料探测热带大气边界层高度[C]//中国地球物理学会第二十四届年会论文集. 北京, 2008: 379

[4] Sun-Mack S, Minnis P, Chen Y, et al. Regional apparent boundary layer lapse rates determined from CALIPSO and MODIS data for cloud-height determination [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2014, 53(4): 990-1011

[5] Wood R, Bretherton C S. Boundary layer depth, entrainment, and decoupling in the cloud-capped subtropical and tropical marine boundary layer [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(18): 3576-3588

[6] Russell P B, Uthe E E, Ludwig F L, et al. A comparison of atmospheric structure as observed with monostatic acoustic sounder and lidar techniques [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1974, 79(36): 5555-5566

[7] Beyrich F. Mixing height estimation from sodar data: a critical discussion [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(23): 3941-3953

[8] Kumar K K, Jain A R. L band wind profiler observations of convective boundary layer over Gadanki, India (13.5°N, 79.2°E) [J]. *Radio Science*, 2006, 41(2): 1-12

[9] 廖麒麟, 赵小峰, 石汉青, 等. 基于COSMIC资料的边界层高度时空特征分析[J]. *气象科学*, 2015, 35(6): 737-743

LIAO Qixiang, ZHAO Xiaofeng, SHI Hanqing, et al. Spatial and temporal characteristics of the boundary layer height based on COSMIC radio occultation data [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2015, 35(6): 737-743

[10] 刘艳, 唐南军, 杨学胜. 利用COSMIC/GPS掩星折射率资料研究海洋边界层高度的特点[J]. *热带气象学报*, 2015, 31(1): 43-50

LIU Yan, TANG Nanjun, YANG Xuesheng. Height of atmospheric boundary layer top as detected by COSMIC GPS radio occultation data [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2015, 31(1): 43-50

[11] Guo P, Kuo Y H, Sokolovskiy S V, et al. Estimating atmospheric boundary layer depth using COSMIC radio occultation data [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2011, 68(8): 1703-1713

[12] 周文, 杨胜朋, 蒋熹, 等. 利用COSMIC掩星资料研究青藏高原地区大气边界层高度[J]. *气象学报*, 2018, 76(1): 117-133

ZHOU Wen, YANG Shengpeng, JIANG Xi, et al. Estimating planetary boundary layer height over the Tibetan Plateau using COSMIC radio occultation data [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2018, 76(1): 117-133

[13] Gamage N, Hagelberg C. Detection and analysis of micro-fronts and associated coherent events using localized transforms [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1993, 50(5): 750-756

[14] Ratnam M V, Basha S G. A robust method to determine

- global distribution of atmospheric boundary layer top from COSMIC GPS RO measurements [J]. Atmospheric Science Letters, 2010, 11(3): 216-222
- [15] 徐晓华, 刘树纶, 罗佳. 利用 COSMIC 掩星折射指数分析全球大气边界层顶结构变化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(1): 94-100
XU Xiaohua, LIU Shulun, LUO Jia. Analysis on the variation of global ABL top structure using COSMIC radio occultation refractivity [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(1): 94-100
- [16] 朱洲宗, 徐晓华, 罗佳. 利用 FY-3C 折射率对大气边界层高度的反演与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(3): 395-401
ZHU Zhouzong, XU Xiaohua, LUO Jia. Inversion and analysis of atmospheric boundary layer height using FY-3C radio occultation refractive index data [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(3): 395-401
- [17] 王耀兴. GPS 掩星反演廓线质量分析及大气边界层高度反演研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020
WANG Yaoping. Quality analysis of GPS occultation inversion profile and atmospheric boundary layer inversion study [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020
- [18] Klein S A, Hartmann D L. The seasonal cycle of low stratiform clouds [J]. Journal of Climate, 1993, 6(8): 1587-1606
- [19] Seidel D J, Zhang Y H, Beljaars A, et al. Climatology of the planetary boundary layer over the continental United States and Europe [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(D17): D17106

Temporal and spatial distribution of oceanic boundary layer based on COSMIC and ERA-Interim refractive index

YUAN Shuai¹ TANG Geshi¹ GAO Peng²

¹ School of Remote Sensing & Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

² School of Resource Engineering, Longyan University, Longyan 364012

Abstract The spatial and temporal distribution of the oceanic boundary layer height is determined by wavelet covariance transform method using COSMIC and ERA-Interim refractive index data independently, then the difference between results of the two datasets is comparatively analyzed. The results show that a roughly same spatial pattern of not completely symmetrical distribution of the boundary layer height along the equator is observed for the inversion results of the two datasets. As for the seasonal and monthly variations, the oceanic boundary layer is relatively high in summer. Though no obvious diurnal variation is observed, it should be noted that the diurnal variation of boundary layer height from ERA-Interim data is more consistent with that of solar radiation. The comparison shows that the inversion results of COSMIC data are about 500–1 000 meters higher than those of ERA-Interim data, and the difference is greater in high latitudes than in low latitudes and smaller in summer than in winter.

Key words COSMIC occultation; ERA-Interim; refractive index; oceanic boundary layer; wavelet covariance variation; spatial-temporal distribution characteristics