海南站地基数字测高仪探测的电离层B0与B1参数变化研究

朱正平,付煜
(中南民族大学 电子信息工程学院,湖北 武汉 430074)

摘 要 基于2015年至2018年海南站(18.34°N, 109.62°E)地基数字测高仪的探测数据,分析了海南地区电离层底部参数B0和B1的日变化与季节变化特征及规律;对比了观测结果(B0_Obs、B1_Obs)与IRI-2020模型的预测结果(B0_Tab/B1_Tab和B0_Gul);研究了(B0, B1)的变化性(以四分位距与中值的百分比比率表示)以及(B0, B1)参数与其他电离层特性(hmF2和M(3000)F2)之间的相关性.结果表明:IRI-2020模型在低纬度区域存在预测偏差,且两种选项(Bil-2000与Gulyaeva)呈现出相反的偏差趋势,说明该模型在海南地区并不完全适用,有待改进;B0在日出前后出现"塌陷"现象,这是低纬度电离层的一个典型特征.B1在该时段变异显著增大(约68%),说明电离层结构在这个时间段可能较不稳定;相关性分析显示,白天时段B0和B1与hmF2和M(3000)F2均呈较强正相关特性.这些结果为提高IRI模型在海南地区的适用性提供了观测依据,对利用hmF2和M(3000)F2反演底部剖面参数具有参考价值.

关键词 海南地区电离层;数字测高仪;电离层底部参数B0和B1;IRI模型
中图分类号 P352 **文献标志码** A **文章编号** 1672-4321(2026)04-0514-09
doi:10.20056/j.cnki.ZNMDZK.20250861

Research on the variation of ionospheric B0 and B1 parameters detected by the digital height gauge of the foundation at Hainan station

Zhu Zhengping, Fu Yu
(College of Electronics and Information Engineering, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, Hubei China)

Abstract Based on the detection data of the digisonde at Hainan station (18.34°N, 109.62°E) from 2015 to 2018, the diurnal and seasonal variations of the ionospheric bottomside parameters B0 and B1 in Hainan areas have been analyzed. A comparison was conducted between observed values (B0_Obs, B1_Obs) and the prediction results of the IRI-2020 model (B0_Tab/B1_Tab and B0_Gul). The variability of B0 and B1 (expressed as the percentage ratio of the interquartile range to the median) and their correlations with other ionospheric characteristics (hmF2 and M(3000)F2) were also investigated. Results reveal the IRI-2020 model shows prediction deviations in low-latitude regions and its Bil-2000 and Gulyaeva options demonstrate opposite deviation trends. This finding indicates that the model is not fully applicable to the Hainan region and requires improvement. B0 shows a "collapse" phenomenon around sunrise, which is a typical feature of the ionosphere at low latitudes. The B1 parameter shows high variability (~68%) before and after sunrise. It indicates that the ionospheric structure may be relatively unstable during this period. Correlation analysis reveals that both B0 and B1 exhibit strong positive correlations with hmF2 and M(3000)F2 during daytime. These results provide provides observational evidence for improving the applicability of the IRI model in Hainan regions and offers valuable insights for inverting bottom side profile parameters using hmF2 and M(3000)F2.

Keywords the ionosphere over Hainan; digisonde; ionospheric bottomside parameters B0 and B1; IRI model

收稿日期 2025-10-10
作者简介 朱正平(1968-),男,教授,博士,研究方向:电离层无线电传播,信号检测与信息处理,电离层垂直探测设备的研究与开发,无线电探测新观测模式,E-mail:zpzhu2007@sina.com
基金项目 国家自然科学基金资助项目(41474135)

电离层是地球周围高层大气的一部分，距地球表面约 60~1000 km[1]. 它由大量自由电子和离子组成，通过散射、折射、吸收等多种效应对穿越其中的电磁波产生重要影响[2].

国际参考电离层模型（International Reference Ionosphere，IRI）是一个由空间研究委员会（Committee on Space Research，COSPAR）和国际无线电科学联盟（International Union of Radio Science，URSI）于 1968 年联合发起的项目，旨在制定地球电离层的国际标准模型[3]，它是用于估算表征电离层状态参数的最广泛应用的经验模型之一. 该模型会随着新数据的出现持续更新，在过去二十年间已历经多次迭代[4]，其中包括 IRI-2001[5]、IRI-2007[6]、IRI-2012[7]以及 IRI-2016[8]等多个版本. 目前，最新的官方版本是发布于 2022 年 8 月的 IRI-2020[9].

在 IRI 模型中，底侧电子密度剖面的表述基于 F2 层峰值电子密度（NmF2）、峰值高度（hmF2）、底侧厚度参数（B0）以及形状参数（B1）共同确定[10]. 诸如数字式便携探测仪（Digital Portable Sounder，DPS）之类的电离层探测仪，通过获取直至 hmF2 的电子密度垂直剖面来测量电离层电子密度（Ne），该高度处的电子密度达到最大值（Ne=NmF2）. 电离层截至此峰值点的部分称为底部区域，而电离层的上层部分称为顶部区域[11]. B0 是指最大电子密度高度（hmF2）与另一特定高度之间的差值，该特定高度的确定取决于 F1 层的情况：若不存在 F1 层，则取电子密度降至 NmF2 的 0.24 倍时的高度（$h0.24$）；若存在 F1 层，则取 F1 层的峰值高度（hmF1）. B1 则是用于描述计算 B0 时所涉及的两个高度之间的底部剖面形状特征[12]. B0 与 B1 是电离层底部区域的两个重要特征参量，它们通常作为 IRI 中确定底部剖面形态的输入参数[13]. IRI-2020 模型为 B0 提供了三种选项. 第一种是“Gul-1987”选项，该选项基于中纬度台站观测数据建立的 hmF2 与半密度高度（电子密度降至 F2 峰值一半时的高度）之间的函数关系，并将此相关性转化为 B0 的数学模型. 第二种是“Bil-2000”选项，采用通过赤道、低纬和中纬度台站电离图剖面反演推导出的 B0 数值表. 最后一种是“ABT-2009”选项[14]. 在 IRI 中，底部 F2 层的电子密度 $N(h)$ 分布由以下关于 F2 峰密度 NmF2、F2 峰高度 hmF2、底侧厚度参数 B 0 和形状参数 B1 的解析函数描述[15]：

$$N(h) = \mathrm{NmF2} \cdot \frac{\exp\left(-x^{\mathrm{B1}}\right)}{\cosh(x)},\ x = \frac{\mathrm{hmF2} - h}{\mathrm{B0}}. \quad (1)$$

在下文中，观测的 B0 和 B1 被称为 B0_Obs 和 B1_Obs，基于 IRI 模型“Gul-1987”选项的 B0 被称为 B0_Gul，基于 IRI 模型“Bil-2000”选项的 B0 和 B1 被称为 B0_Tab 和 B1_Tab. 所有图中的时间都是地方时间（Local Time，LT）.

1　使用的数据和方法

电离层测高仪是利用地基探测的方式对电离层进行研究的主要设备[16]，采用脉冲编码、频率交错等技术得到各种电离层参数[17]，包括 B0、B1、hmF2、NmF2、M（3000）F2 等.

本文利用 2015 年至 2018 年海南站（18.34°N，109.62°E）电离层测高仪探测的数据分析了海南地区 B0 和 B1 参数的日变化与季节变化规律，并将观测到的 B0 和 B1 参数与 IRI 模型预测结果进行对比，日变化数据的时间分辨率为 15 分钟.

四分位距与中值的百分比比率（定义为 InterQuartiles/Median × 100%）可用作参数变化性的度量[18]，很容易证明 InterQuartiles/Median × 100% = （CU-CL）× 100%. 本文通过四分位间距与中值的百分比比率进一步探讨了 B0、B1 的变异特征及其与 hmF2、M（3000）F2 的相关性.

本文提取了 IRI 模型提供的两种 B0 和 B1 参数选项：基于 Bil-2000 的 B0_Tab/B1_Tab 和基于 Gulyaeva 方法的 B0_Gul. 同时，还获取了其他所需的电离层参数. 最后，将上述处理得到的观测数据与 IRI 模型模拟数据进行可视化对比分析.

2　结果与分析

2.1　（B0，B1）的日变化和季节变化

图 1 和图 2 分别展示了 2015 年至 2018 年海南站观测得到的电离层底部参数 B0_Obs 和 B1_Obs 的月中位数的日变化和季节变化特征. 图 1 显示 B0 参数具有显著的日变化和季节变化规律，其值在夏季白天最高，冬季夜间最低. 在春秋与冬季日出前后 B0 常出现明显“塌陷”，而且冬季塌陷幅度明显大于春秋季，这一变化趋势与低纬度其他台站观测一致. 图 2 显示 B1 参数也具有显著的日变化和季节变化规律，其值在夏季白天最低，在冬季最高.

结合两张图可以看出，B0 和 B1 都具有显著的日变化和季节变化规律，且在一天中 B0 值最高的时段 B1 值最低，B0 值最低的时段 B1 值最高.

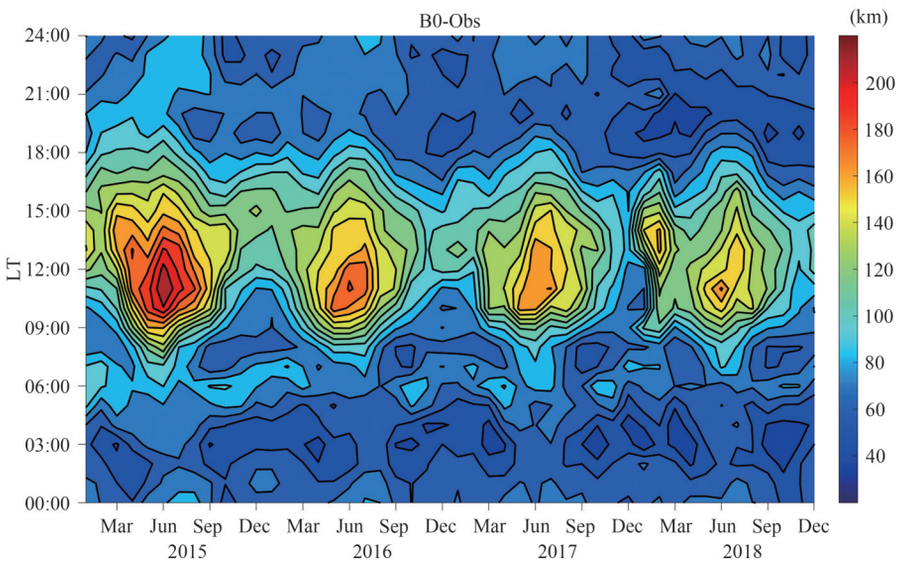


图1 海南B0_Obs的月中位数

Fig. 1 Hainan B0_Obs monthly median values

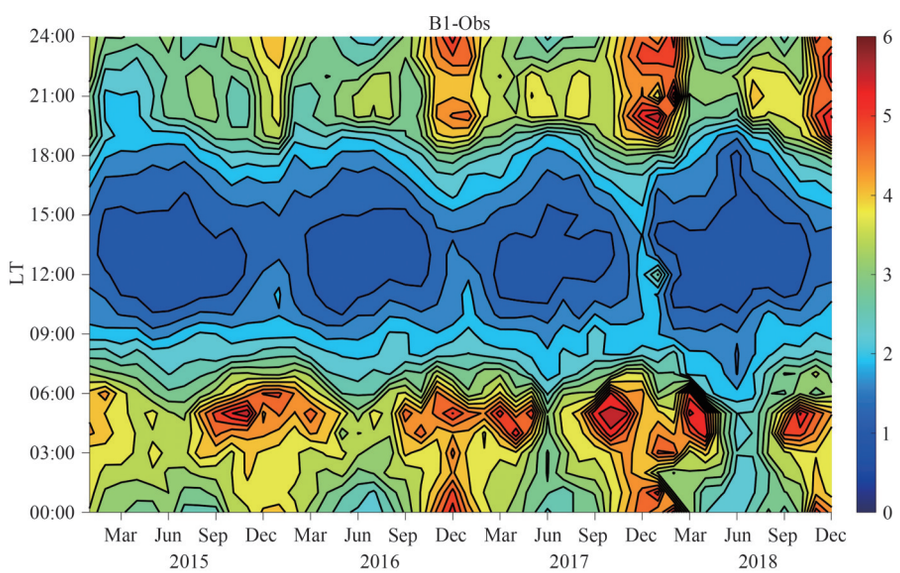


图2 海南B1_Obs的月中位数

Fig. 2 Hainan B1_Obs monthly median values

2.2 与IRI模型结果的比较

图3和图4分别展示了2015年至2018年IRI-2020模型给出的海南站B0_Tab和B0_Gul参数,对比可以清楚地看出B0的观测值与IR-I2020模型的预测值的之间存在一些系统性差异.同时,从两张图中可以看出B0值的"塌陷"特征在Gulyaeva选项结果中或多或少有所体现,在Bil-2000选项结果中却没有体现.

图5展示了2015年至2018年IRI-2020模型给出的海南站B1_Tab参数,从图中可以看出B1_Tab同样表现出明确的日变化特征,其值在白天较低,在夜间较高.然而,与B1_Obs相比,B1_Tab的季节变化特征较为微弱.

图6展示了2015年至2018年海南站四个地方时B0的观测值和IRI-2020模型的预测值的变化,可以看出不同地方时B0_Obs、B0_Gul和B0_Tab之间存在明显的系统性偏差.在00:00LT,两种模型选项在大部分季节与观测值较为吻合;在06:00LT,B0_Tab通常高于B0_Obs,尤其在秋冬季节偏差最为显著,而B0_Gul则与B0_Obs偏差较小,大部分时间二者较为吻合;在12:00LT,B0_Tab通常低于B0_Obs,而B0_Gul在夏季通常高于B0_Obs,在冬季与观测值较为吻合;在18:00LT,夏季时B0_Tab通常高于B0_Obs,冬季时二者则较为吻合,而B0_Gul在夏季与观测值较为吻合,在冬季通常高于B0_Obs.

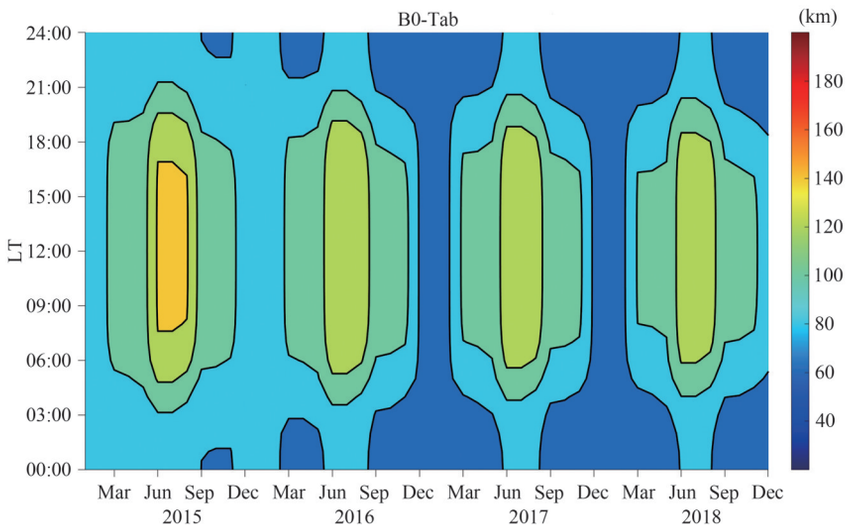


图 3　IRI2020 模型海南站的 B0_Tab

Fig. 3　IRI2020 Model Hainan Station B0_Tab

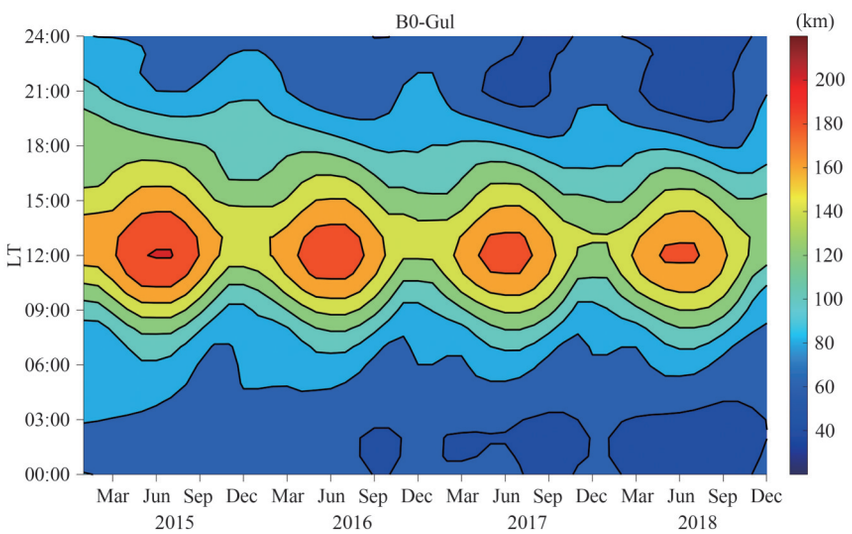


图 4　IRI2020 模型海南站的 B0_Gul

Fig. 4　IRI2020 Model Hainan Station B0_Gul

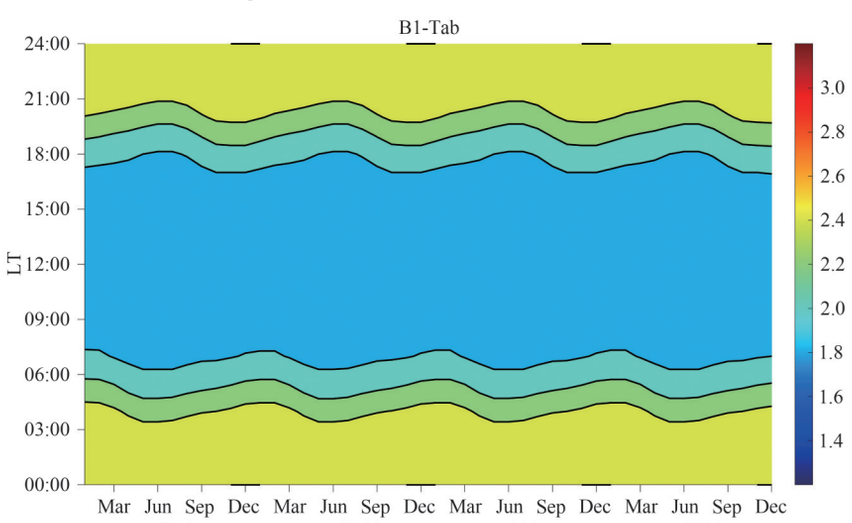


图 5　IRI2020 模型海南站的 B1_Tab

Fig. 5　IRI2020 Model Hainan Station B1_Tab

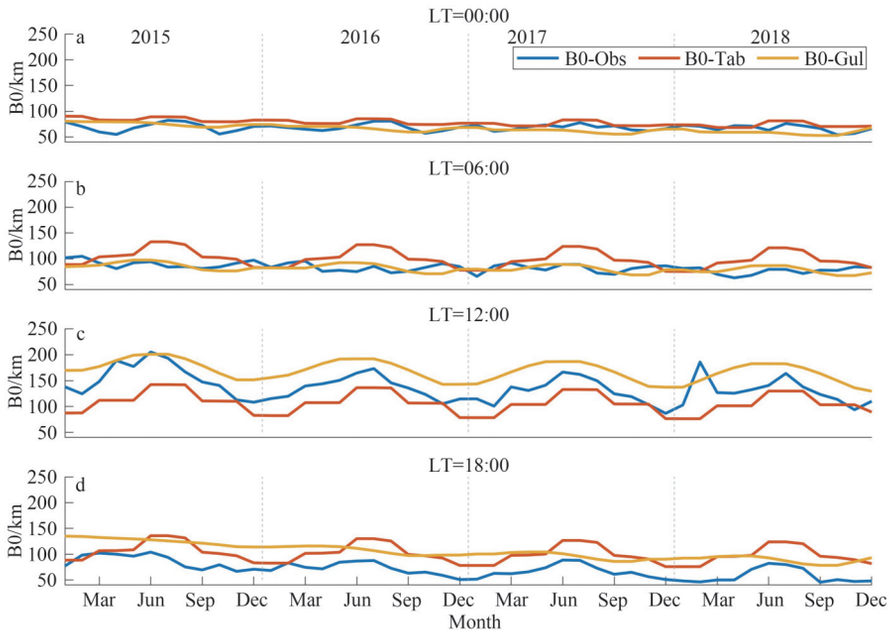


图6 海南站B0参数月变化

Fig. 6 Monthly variation of B0 parameter at Hainan Station

图7通过2015年至2018年海南站B0和B1预测值与观测值的差值展示了二者的偏差,可以看出B0_Tab、B0_Gul以及B1_Tab与观测值的差异的季节变化特征.

结合图6与图7(a)和图7(b)可以看出B0_Tab通常在白天时段(特别在正午前后)低于B0_Obs,在夜间时段高于B0_Obs;B0_Gul的偏差趋势与B0_Tab相反,通常在夏季白天高于B0_Obs.

对于B1参数,由图7(c)可以看出B1_Tab通常在白天高于B1_Obs,在夜间则是低于B1_Obs,这种现象在冬季最为明显.这些结果表明B0_Tab和B1_Tab相对于B0_Obs和B1_Obs值的偏差呈现出相反的趋势.总而言之,当B0_Tab负偏离(低于)B0_Obs时,B1_Tab正偏离(高于)B1_Obs,反之亦然.

2.3 (B0,B1)的变化性

图8展示了2015年至2018年海南站B0和B1参数的月度下四分位数(Lqt)、上四分位数(Uqt)及中位数(Med)的线性回归结果.从图中可以看出B0和B1的月度上下四分位数与中位数具有良好的线性关系,所有回归方程的决定系数R^2均高于0.92,这表示B0和B1参数的月度上下四分位数与中位数之间存在很强的线性相关性.说明对月度上(下)四分位数与月度中值进行回归分析是合理的,为通过回归分析量化参数变化性提供可靠基础.

图9进一步展示了2015年至2018年海南站B0和B1参数的回归系数CU和CL的日变化特征,其中CU=Uqt/Med,CL=Lqt/Med.

图9中细线是将数据2015年至2018年四个年份分组得到的结果,粗线是使用所有四年数据一起得到的结果.可以看到B0和B1参数的CU和CL值呈现出明显的日变化,且相对于数值1近似对称分布.B0的CU值在1.1~1.3之间变化,CL值在0.7~0.9之间变化;B1的CU值在1.1~1.4之间变化,CL值在0.7~0.9之间变化.这种对称分布说明B0和B1参数具有显著的日变化规律.

图10展示了2015年至2018年海南站B0和B1参数的四分位距与月中值的百分比比率的日变化.

从图中可以看出B0的变异性范围为25%-45%,在日出前时段达到最大值,在午后时段降至最低.文献[19]中提到B1参数的变异性表现出显著的日变化特征,其值在白天通常高于夜间.但是我们的研究中B1的变异性在日出时分出现了一个异常峰值,其值高达68%,远高于其他时段.我们推测这可能源于日出前后低纬度电离层剧烈的光化学和动力学过程所导致的高度不稳定性,也可能与少量由电离层扰动或数据反演误差引起的异常值有关.未来需要更多的数据来进一步验证和分析这一异常峰值的物理机制及其统计显著性.

2.4 (B0, B1)与hmF2、M(3000)F2的相关性分析

电离层F2层传播因子(M(3000)F2)在无线电通信应用的频率规划及电离层研究中起着至关重要的作用[20],其定义为3000公里距离处的最高可用

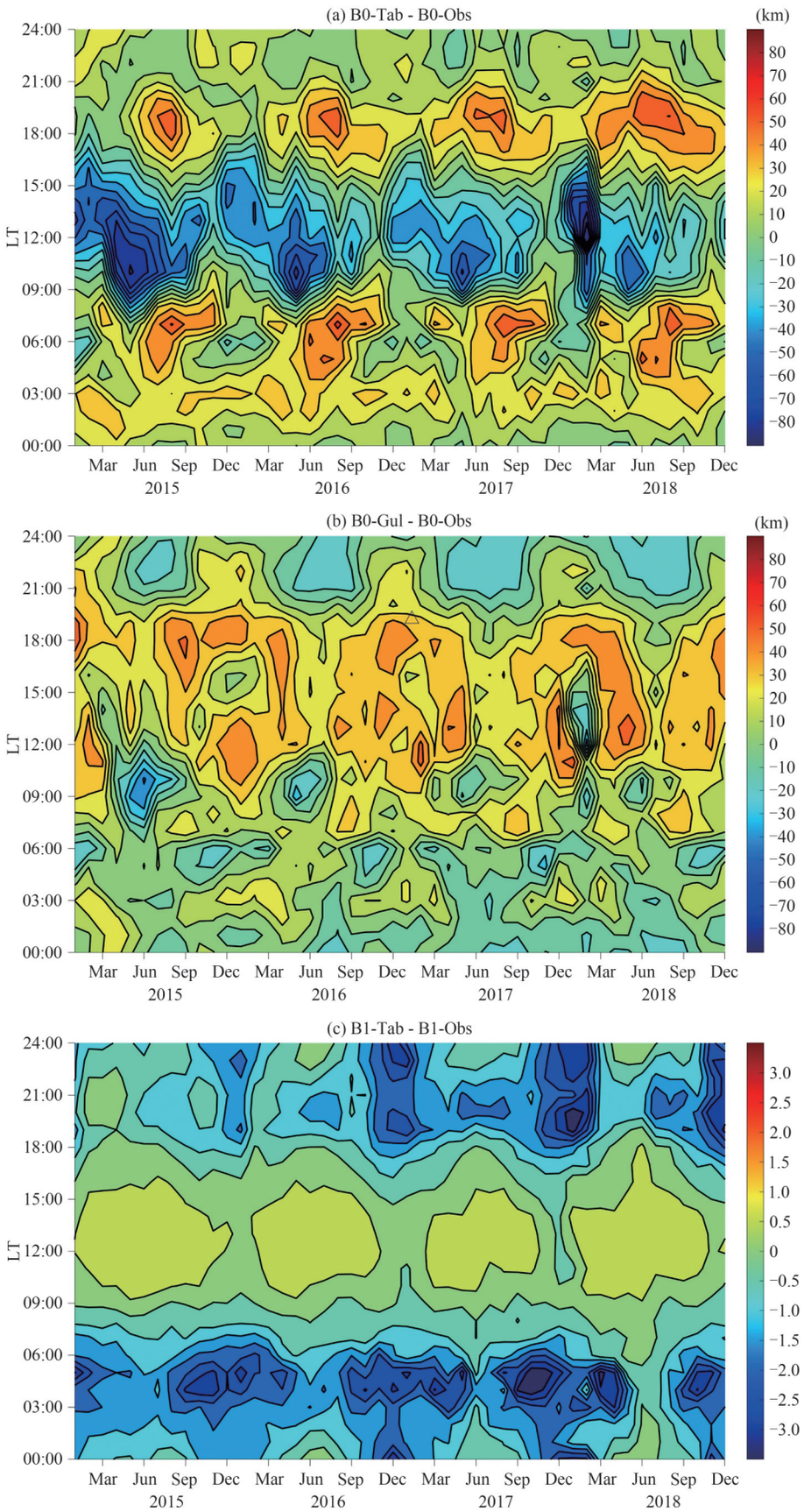


图 7　B0、B1 预测值与观测值的偏差对比

Fig. 7　Comparison of deviation between predicted and observed values of B0 and B1

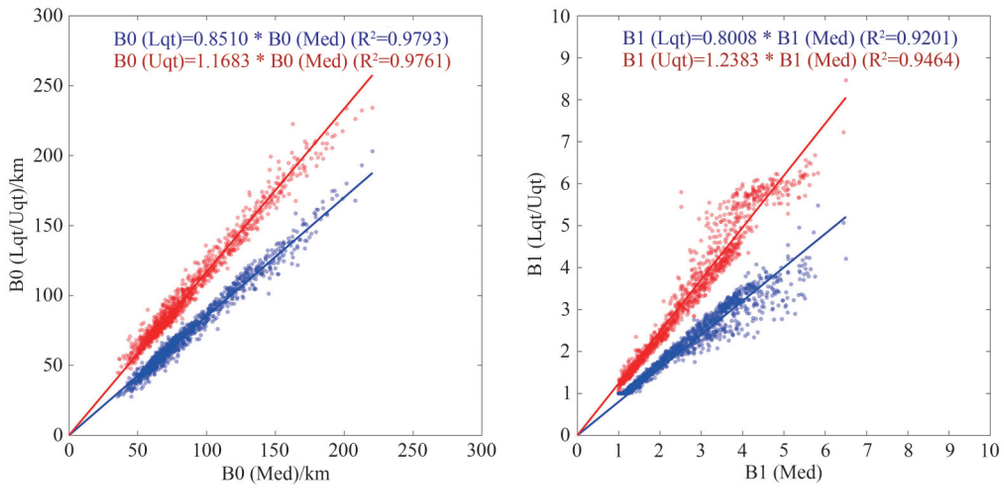


图8 B0与B1的月下四分位数和上四分位数与其月中位数的散点图

Fig. 8 Scatter plots of the monthly lower and upper quartiles versus the monthly median values for B0 and B1

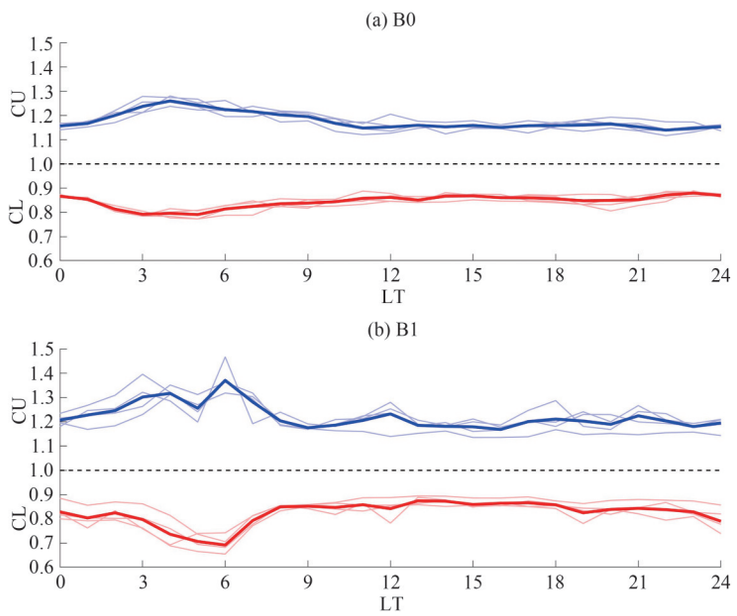


图9 B0和B1的回归系数CU与CL的日变化

Fig. 9 Diurnal variations of the regression coefficients CU and CL for B0 and B1

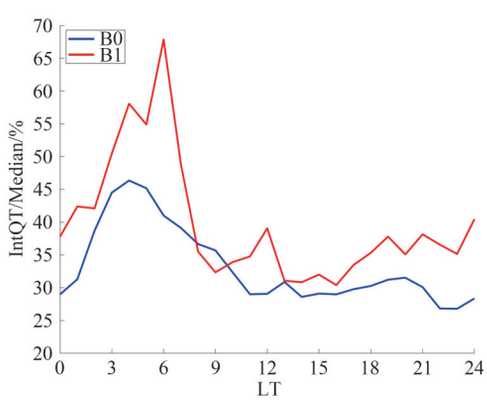


图10 B0和B1的四分位距与月中值百分比比的日变化

Fig. 10 Diurnal variations of the percentage ratios of inter-quartiles to monthly median value for B0 and B1

频率(MUF)与F2层临界频率的比率[21].

图11展示了2015年至2018年海南站B0和B1参数与hmF2、M(3000)F2之间的线性相关系数日变化特征.从图11(a)可以看出,B0参数与hmF2和M(3000)F2之间存在显著的相关关系.B0与hmF2在日间时段保持较强的正相关性(R≈0.8),说明随着F2层峰值高度的增加底部厚度参数B0也相应增大;与此相反,B0与M(3000)F2在日间时段表现出较强的负相关性(R≈-0.8),这与M(3000)F2本身与hmF2的反比关系一致.

图11(b)展示了B1参数与hmF2、M(3000)F2以及B0的相关性日变化.B1与hmF2在日间时段表

现出中等程度的负相关性（R≈-0.6），这说明较高的 F2 层峰值高度对应着较陡的底部剖面形状（较小的 B1 值）；B1 与 M（3000）F2 在相同时段则表现出中等程度的正相关性（R≈0.5）；B0 与 B1 在日间时段存在强烈的负相关性，这表明较厚的底部剖面（较大的 B0）通常对应着较平缓的形状（较小的 B1），反之亦然.

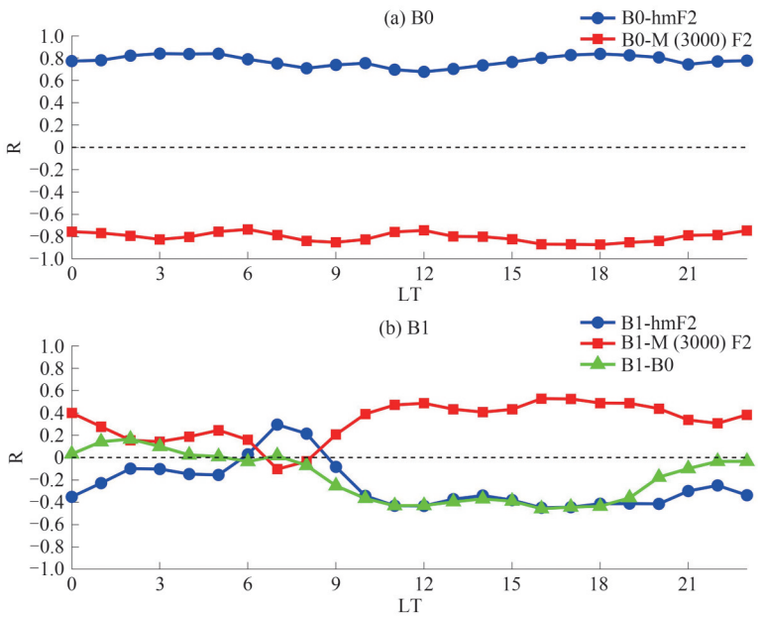


图 11　（B0-hmF2，B0-M（3000）F2 及 B1-hmF2、B1-M（3000）F2 和 B1-B0 的相关系数 R 的日变化

Fig. 11　Diurnal variations of the correlation coefficient R for B0-hmF2，B0-M（3000）F2 and B1-hmF2，B1-M（3000）F2 and B1-B0

这些相关性分析结果表明，在日间时段，B0 和 B1 参数与 hmF2 和 M（3000）F2 之间存在稳定且较为强烈的相关关系，这为使用更容易获取的 hmF2 或 M（3000）F2 数据来推断 B0 和 B1 参数提供了可能性.

3　总结

基于电离层测高仪得到的 2015 年至 2018 年海南站（18.34°N，109.62°E）电离层探测数据，本研究主要分析了海南地区电离层底部参数 B0 和 B1 的行为变化性.具体包括时间变化特征、与 IRI-2020 模型的差异、变化性及与其他电离层参数的线性相关性.本研究得到结论如下：

B0 和 B1 在海南地区表现出复杂的昼夜与季节变化.B0 夏季白天最大、冬季夜间最小，日出前后存在典型“塌陷”现象，这是海南地区以及其他低纬度地区电离层的一个典型特征；B1 的日变化相位与 B0 相反，其值通常在夜间高于白天，在夏季低于冬季.

IRI-2020 模型对我国海南地区 B0 和 B1 的预测存在系统性偏差，其 Bil-2000 和 Gulyaeva 两种选项偏差趋势相反：对于白天时段，夏季 B0_Tab 与 B0_Obs 的一致性优于 B0_Gul，冬季 B0_Gul 与 B0_Obs 的一致性优于 B0_Tab；对于夜间时段，B0_Gul 与 B0_Obs 的一致性优于 B0_Tab.B1_Tab 相较于 B1_Obs 没有太大的变化幅度，在夜间尤其偏低.B1_Tab 结果与 B1_Obs 的偏差呈现出相反的趋势（特别是在地方中午时分左右）.这说明该模型在海南地区并不完全适用，还有待改进.

海南地区 B0 和 B1 的月上下四分位数与中位数表现出强线性关系，B0 变化在日出前最大、午后最小.B1 变化在日出时出现异常高值（约 68%），超出寻常范围，可能与日出时低纬电离层强烈光化学和动力学过程导致的不稳定性有关，或受少量扰动及反演异常影响，该现象机制需进一步结合多数据与模拟验证.

海南地区日间 B0、B1 与 hmF2、M（3000）F2 显著线性相关.B0 与 hmF2 呈较强正相关，与 M（3000）F2 呈较强负相关；B1 与 M（3000）F2 呈正相关，与 B0 和 hmF2 呈负相关.这表明使用更容易从电离图中获取或从其他手段如全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System，GNSS）获取的 hmF2 或 M（3000）F2 参数来构建 B0 和 B1 的经验模型或进行数据同化是一条可用的技术途径，能够帮助改善电离层底部形态的建模精度.

参 考 文 献

[1] 蓝加平, 刘凯, 朱正平, 等. 中国东部地区电离层foF2在第22-23太阳活动周时空变化特性[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 186-193.

[2] Qi A, Hao X, Ruan H, et al. Assessment and comparison of IRI and USTC models in low-latitude regions [J]. Advances in Space Research, 2025, 75(6): 4886-4895.

[3] Pignalberi A, Pietrella M, Pezzopane M. Towards a real-time description of the ionosphere: A comparison between international reference ionosphere (IRI) and IRI real-time assimilative mapping (IRTAM) models [J]. Atmosphere, 2021, 12(8): 1003.

[4] Zossi B S, Fagre M, De Haro Barbas B F, et al. Ionospheric conductance using different IRI F_2 layer models[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2021, 225: 105759.

[5] Bilitza D. International reference ionosphere 2000 [J]. Radio Science, 2001, 36(2): 261-275.

[6] Bilitza D, Reinisch B W. International reference ionosphere 2007: Improvements and new parameters[J]. Advances in Space Research, 2008, 42(4): 599-609.

[7] Bilitza D, Altadill D, Zhang Y, et al. The International Reference Ionosphere 2012-a model of international collaboration [J]. Journal of Space Weather and Space Climate, 2014, 4: A07.

[8] Bilitza D, Altadill D, Truhlik V, et al. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions[J]. Space Weather, 2017, 15(2): 418-429.

[9] 刘国其, 李昊昱, 解朝娣, 等. 太阳活动下降年昆明地区TEC变化特征与IRI-2020模拟比较分析[J]. 空间科学学报, 2023, 43(2): 241-250.

[10] Panda S K, Haralambous H, Kavutarapu V. Global longitudinal behavior of IRI bottomside profile parameters from FORMOSAT-3/COSMIC ionospheric occultations[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2018, 123(8): 7011-7028.

[11] Ameen M A, Khursheed H, Jabbar M A, et al. Variation of bottom-side profile parameters (B0, B1) over Multan and their comparisons with IRI-2016 during deep solar minimum of solar cycles 23/24[J]. Advances in Space Research, 2021, 68(5): 2059-2068.

[12] Panda S K, Haralambous H. Variability of the bottomside B0 and B1 parameters of ionospheric electron density profile over Cyprus and comparison with IRI-2012 model[J]. Advances in Space Research, 2017, 60(2): 317-328.

[13] Kumar Singh A, Haralambous H, Kumar Panda S. Comparison of bottomside ionospheric profile parameters (B0 and B1) extracted from FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS Radio occultations with Digisondes and IRI-2016 model[J]. Advances in Space Research, 2022, 70(4): 1121-1141.

[14] Jamjareegulgarn P, Supnithi P, Watthanasangmechai K, et al. A new expression for computing the bottomside thickness parameter and comparisons with the NeQuick and IRI-2012 models during declining phase of solar cycle 23 at equatorial latitude station, Chumphon, Thailand[J]. Advances in Space Research, 2017, 60(2): 329-346.

[15] Zhang M L, Shi J K, Wang X, et al. Comparative study of ionospheric characteristic parameters obtained by DPS-4 digisonde with IRI2000 for low latitude station in China[J]. Advances in Space Research, 2004, 33(6): 869-873.

[16] 朱正平, 陈盈, 蓝加平. 敏捷数字测高仪正交有源环天线设计与应用[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2020, 39(3): 270-276.

[17] 朱正平, 展旭强. 电离层测高仪高速采集系统设计[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2020, 39(2): 186-194.

[18] Zhang M L, Shi J K, Wang X, et al. Ionospheric variability at low latitude station: Hainan, China [J]. Advances in Space Research, 2004, 34(9): 1860-1868.

[19] Zhang M L, Wan W, Liu L, et al. Variability of the behavior of the bottomside (B0, B1) parameters obtained from the ground-based ionograms at China's low latitude station[J]. Advances in Space Research, 2008, 42(4): 695-702.

[20] Bai H, Feng F, Wang J, et al. Modeling M(3000)F_2 based on extreme learning machine [J]. Advances in Space Research, 2020, 65(1): 107-114.

[21] Wang J, Feng F, Bai H M, et al. A regional model for the prediction of M (3000) F_2 over East Asia [J]. Advances in Space Research, 2020, 65(8): 2036-2051.

(责编&校对 雷建云)