

武汉地区电离层电子浓度总含量的统计经验模式研究^{*}

陈艳红 万卫星 刘立波 李利斌

(中国科学院武汉物理与数学研究所 武汉 430071)

摘 要

由武汉电离层观象台一个太阳黑子周期(1980—1990年)的实测电离层电子浓度总含量(TEC)资料,统计分析得出了武汉地区的一个TEC经验模式.模式很好地再现了武汉地区的TEC观测值.其预测误差在太阳活动高年稍大,低年较小;在春秋两季稍大,冬夏两季较小;在当地时间白天和傍晚稍大,夜间和早晨较小.此外,与国际参考电离层模式IRI的计算结果比较,本模式预测的TEC值更接近于实际观测结果.同时,本文也初步探讨了TEC的半年变化特征和冬季异常现象.

关键词 电离层—TEC—统计经验模式

1 引言

无论是在电离层物理的理论研究中,还是在电离层电波传播的实际应用中,电离层电子浓度总含量(TEC)都是一个很有价值的参量,因此,许多作者进行了大量的实际观测和理论研究^[1-3].在TEC的研究和应用中,采用模式方法,特别是与实际观测数据相联系的经验模式方法是一种十分有效的手段.现已有许多的工作^[4-9],例如,马健敏和龙其利^[4]利用新乡站1982—1989年间测得的TEC数据,首次应用TEC与太阳黑子数滑动均值的线性关系,建立了TEC的经验模式. Gulyaeva^[7]利用1981年和1986年的观测数据,将TEC表达为地方时、季节的周期函数及地磁纬度的函数,构建了一个适合南美洲地区的分析模式.

在上述两个TEC经验模式的例子中,前者强调TEC和太阳活动参数的关系,后者强调TEC与地方时、月份、纬度等参数之间的关系.本文试图将两者结合起来,先分析TEC与太阳活动参数的关系,然后进行TEC与地方时等参数之间关系的周期分析,得出一个适合武汉地区的电离层电子浓度总含量的统计经验模式.

2 实验数据和模式的构建

本文采用的TEC数据来自于武汉电离层观象站1980年4月至1990年12月对ETS-II卫星信标的法拉第旋转测量,其信标路径上电子浓度剖面质心高度(取为420 km)的对

^{*} 国家自然科学基金(49974039), 重点项目(40134020), 国家重点基础研究规划项目(G2000078407)资助
2001-04-19 收到原稿, 2001-11-07 收到修订稿

下点的经纬度为 (115.6°E, 28.0°N). 我们采用每半小时一个数据, 利用同期观测的武汉电离层临界频率数据进行定标, 建立了一个太阳黑子周期的 TEC 观测数据库^[1]. 首先, 同大多数电离层参数一样, TEC 和太阳活动密切相关, 因此我们根据武汉站的 TEC 月中值, 分析 TEC 与太阳 10.7cm 射电流量 $F_{10.7}$ 之间的相关关系. 在图 1 中我们给出了 1、4、7、10 月份正午 (1200) 时刻 TEC 月中值与 $F_{10.7}$ 的月平均值, 可以看出二者有很好的正相关关系.

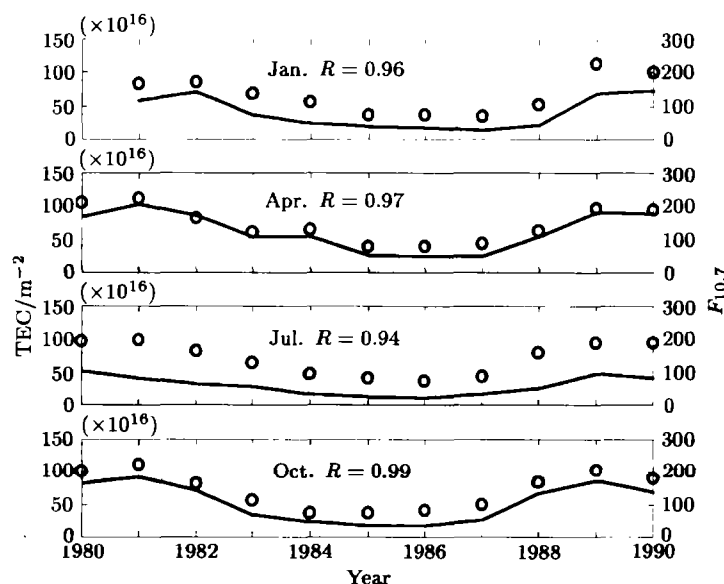


图 1 1980—1990 年 1、4、7、10 月份正午时刻 (1200) 所测 TEC 与 $F_{10.7}$ 的相关关系

(图中 R 为相关系数, $\circ$ 为太阳 10.7cm 射电流量月平均值, — 为 TEC 月中值)

Fig.1 Correlation between TEC observed over Wuhan and $F_{10.7}$ at 1200 O'clock in January April, July and October from 1980 to 1990

因此, 在模式中, 首先将 TEC 与 $F_{10.7}$ 的关系表示为

$$\text{TEC}(h, m) = K_0(h, m) + K_1(h, m) \times \overline{F_{10.7}}. \quad (1)$$

$\overline{F_{10.7}}$ 为 $F_{10.7}$ 的月平均值, h 为地方时, 单位为小时 (这里用 120 EMT), m 为月份. 由于 TEC 随地方时具有明显的周期性变化, 必然会体现在 K_0 和 K_1 对地方时的周期性依赖关系上. 我们将 K_0 和 K_1 对 h 作傅里叶级数展开, 通过计算比较发现二阶以上的级数项对结果影响很小, 因此我们只取至二阶项, 即

$$\begin{aligned} K_i(m) &= A_{i0}(m) + A_{i1}(m) \cos \left\{ \frac{2\pi[h - h_{i1}(m)]}{T} \right\} + A_{i2}(m) \cos \left\{ \frac{4\pi[h - h_{i2}(m)]}{T} \right\} \\ &= C_{i0}(m) + C_{i1}(m) \cos \frac{2\pi h}{T} + C_{i2}(m) \cos \frac{4\pi h}{T} + S_{i1}(m) \sin \frac{2\pi h}{T} + S_{i2}(m) \sin \frac{4\pi h}{T}. \end{aligned} \quad (2)$$

其中,

$$A_{i0} = C_{i0}, \quad A_{i1} = \sqrt{C_{i1}^2 + S_{i1}^2}, \quad A_{i2} = \sqrt{C_{i2}^2 + S_{i2}^2},$$

$$h_{i1} = \frac{T}{2\pi} \arctan \frac{S_{i1}}{C_{i1}}, \quad h_{i2} = \frac{T}{4\pi} \arctan \frac{S_{i2}}{C_{i2}}, \quad (3)$$

$i = 0, 1, T = 24 \text{ h}$. 把 (2) 式带入 (1) 式, 可以将 TEC 表示为

$$\begin{aligned} \text{TEC} &= \text{TEC}_0 + \text{TEC}_1 + \text{TEC}_2, \\ \text{TEC}_0 &= A_{00} + A_{10}F_{10.7}, \\ \text{TEC}_1 &= A_{01} \cos \left[\frac{2\pi(h - h_{01})}{T} \right] + A_{11} \cos \left[\frac{2\pi(h - h_{11})}{T} \right] \cdot \overline{F_{10.7}}, \\ \text{TEC}_2 &= A_{02} \cos \left[\frac{4\pi(h - h_{02})}{T} \right] + A_{12} \cos \left[\frac{4\pi(h - h_{12})}{T} \right] \cdot \overline{F_{10.7}}. \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\text{TEC}_0, \text{TEC}_1, \text{TEC}_2$ 分别代表 TEC 的平均值、周日分量和半日分量, A_{ij} ($i = 0, 1, j = 0, 1, 2$) 和 h_{ij} ($i = 0, 1, j = 1, 2$) 分别表示相应的幅度和相位.

可见, 构建 TEC 经验模式, 实际上是从观测数据的统计分析中, 确定幅度 A_{ij} 和相位 h_{ij} . 实际分析中, 我们首先利用实测 TEC 数据的月中值和 $F_{10.7}$ 参数的月平均值, 采用最小二乘法, 由 (1) 式计算得到 $K_0(h, m)$ 和 $K_1(h, m)$, 然后由 (2) 式利用最小二乘法计算出系数 C_{ij} 和 S_{ij} , 并由 (3) 式计算出幅度 A_{ij} 和相位 h_{ij} , 最后由 (4) 式计算出给定月份 m 和太阳活动参数 $F_{10.7}$ 情况下的 TEC.

根据上述方法, 利用武汉地区 TEC 的观测数据库进行计算, 获得的 TEC 模式系数 A_{ij} 和 h_{ij} 分别于表 1 和表 2 中给出.

表 1 武汉 TEC 统计模式的幅度 A_{ij}

月份	$i = 0$		$i = 1$			
	$j = 0$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 0$	$j = 1$	$j = 2$
1	-133.9	169.7	40.3	2.6	3.0	0.6
2	-129.8	170.1	17.2	2.9	3.1	0.4
3	-174.9	127.8	10.1	3.7	3.0	0.6
4	-183.3	85.1	44.4	4.0	2.3	0.2
5	-92.6	34.0	8.1	2.9	1.4	0.3
6	-15.0	28.6	17.0	1.9	0.7	0.2
7	-68.1	3.3	19.6	2.1	0.8	0.2
8	-59.4	31.4	23.8	2.2	0.9	0.2
9	-124.3	100.5	41.3	3.2	2.1	0.3
10	-269.3	245.7	78.8	4.6	3.8	0.4
11	-145.5	180.5	43.8	3.3	3.1	0.1
12	-84.5	142.0	26.4	2.3	2.7	0.4

图 2 和图 3 分别给出了各阶幅度 A_{ij} 和各阶相位 h_{ij} 随月份的变化关系. 从图 2 中可以看出各阶幅度在春秋两季出现峰值, 在夏季出现谷值. 这说明 TEC 具有异常于太阳活动的半年变化特性. 从图 3 中可以看到周日分量 ($j = 1$) 以及 $i = 0$ 的半日分量 ($j = 2$) 的相位也有很明显的半年变化特征, 最大值出现在春秋季节, 最小值出现在夏季.

表 2 武汉 TEC 统计模式的相位 h_{ij} (h)

月份	h_{ij}	$i = 0$		$i = 1$	
		$j = 1$	$j = 2$	$j = 1$	$j = 2$
1		8	-2	7	-5
2		9	-1	7	5
3		9	-4	6	2
4		-9	5	8	0
5		-10	3	7	3
6		9	0	6	2
7		1	1	7	2
8		-2	-2	10	0
9		-10	-5	11	-4
10		-11	4	10	3
11		12	3	9	1
12		9	-2	7	-5

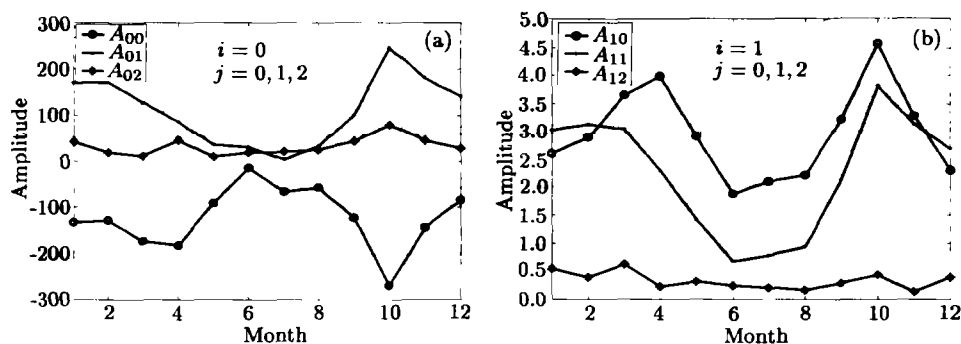
图 2 各阶幅度 A_{ij} 的年变化

Fig.2 Annual variations of each step amplitude

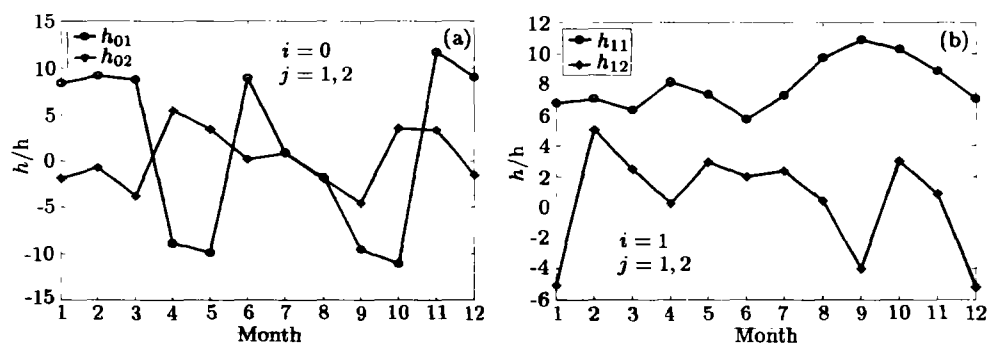
图 3 各阶相位 h_{ij} 的年变化

Fig.3 Annual variations of each step phase

3 模式与观测结果及 IRI 计算结果的比较

为了检验模式的精度, 我们先将 1986 年 (太阳活动低年) 和 1990 年 (太阳活动高年) 两年的观测数据从构建模式的计算过程中剔除, 得到不利用上述两年观测数据的 TEC 模式. 然后, 将该模式预测的 1986 和 1990 年的结果与实际观测的 TEC 月中值比较, 结果如图 4 所示. 另外, 利用国际参考电离层模式 (IRI), 亦可算出电离层电子浓度总含量. 为

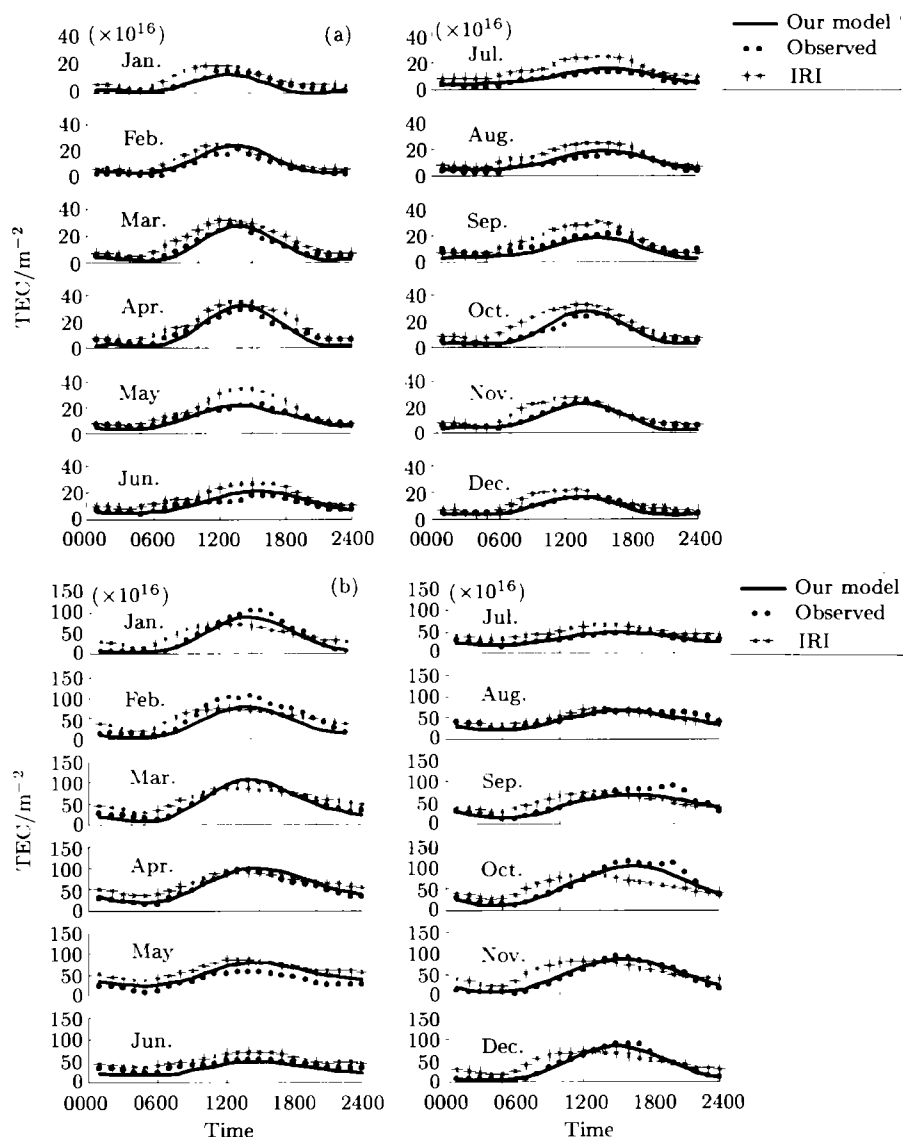


图 4 模式计算的 1986 年 (a) 和 1990 年 (b) TEC 月中值与 IRI 计算结果、实际观测结果的比较

Fig.4 Comparison of diurnal variation of the monthly median of TEC for each month of 1986 and 1990 observed at Wuhan Ionospheric Observatory with their predictions by our TEC model and the model IRI

了进一步证实我们得到的武汉地区的 TEC 经验模式的可靠性, 将 IRI 的计算结果也在图 4 中给出. 由图可以看出, 三者的变化趋势基本上是一致的, 但相比之下, 本文的模式比 IRI 计算的 TEC 要更接近于实际观测值. 此外, 在太阳活动高年, 本文模式的预测及实际观测的 TEC 周日变化与 IRI 的计算结果之间有明显的相位差异.

从图 4 中, 我们还可以看出明显的 TEC 半年变化特征^[2], 即 TEC 值在春秋季节出现峰值, 冬夏季节出现谷值, 与前面幅度计算的结果是一致的. 在 1990 年的结果中, 冬季的日间 TEC 要高于夏季日间 TEC, 这就是 TEC 的“冬季异常”现象^[2], 而在 1986 年的结果中却没有这种现象. 这说明“冬季异常”现象在太阳活动高年表现明显, 在低年则不出现.

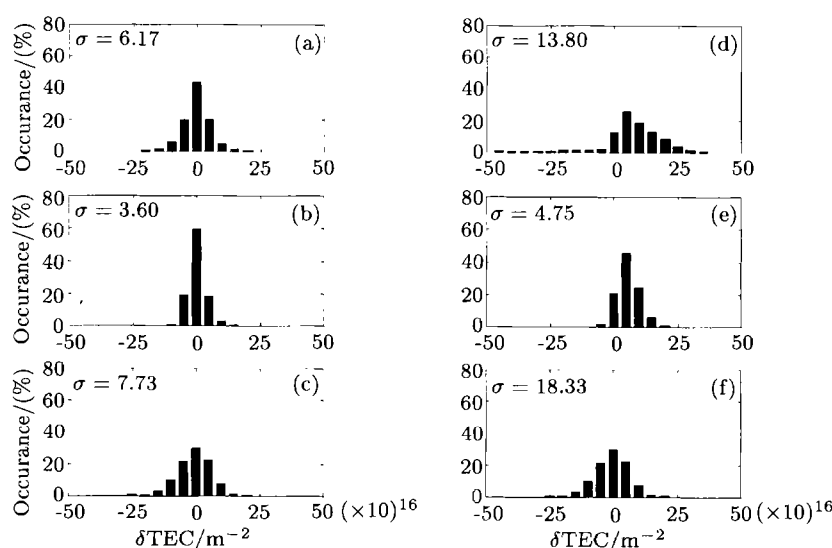


图 5 模式误差 (左) 和 IRI 计算误差 (右) 在所有年份 (a)、(d), 低年 (b)、(e), 高年 (c)、(f) 的统计分析

(图中横坐标表示绝对误差值, 纵坐标表示误差的出现率, 图中的数据表示误差的均方值)

Fig.5 Statistical analysis of errors using model (left) and IRI (right) in all year (a), (d), low solar activity (b), (e) and high solar activity (c), (f) respectively

我们将不同情况下模式预测与实际观测之间的差别进行统计分析, 并将 IRI 与实测值的差别与之进行比较, 统计采用的误差范围的间隔为 5 TECU, 结果如图 5—7 所示. 由图 4 及总的误差分布 (图 5(a)) 可见, TEC 模式预测值与实际观测值符合得较好, 误差的均方值为 6.17 个 TEC 单位 (TECU, $10^{16}/\text{m}^2$). 我们把 1980 年至 1982 年, 1988 年至 1990 年作为太阳活动高年, 1983 年至 1987 年作为低年; 把每年的 3、4、9、10 月作为春秋季, 5、6、7、8 月作为夏季, 1、2、11、12 月作为冬季; 把地方时 2100 时至 0400 时作为夜间, 0500 时至 0800 时作为早晨, 0900 时至 1600 时作为白天, 1700 时至 2000 时作为傍晚分别进行比较. 从图 5—7 中可以看出, 模式误差在低年 (均方误差为 3.60 TECU) 比高年 (均方误差为 7.73 TECU) 小; 在冬季和夏季 (均方误差分别为 6.11 TECU 和 5.73 TECU) 比春秋季 (均方误差为 6.76 TECU) 稍小; 在夜晚和早晨 (均方误差分别为 5.08 TECU 和 3.96 TECU) 比白天和傍晚 (均方误差分别为 6.82 TECU 和

8.22 TECU) 小。同时, 从图 5—7 中还可以看出, 本模式误差均方值都比 IRI 误差的均方值要小得多, 且本模式预测的系统偏差 (-0.24) 比 IRI 的系统偏差 (6.38) 小得多, 这说明模式计算的 TEC 比 IRI 计算的 TEC 更接近于实际观测结果。

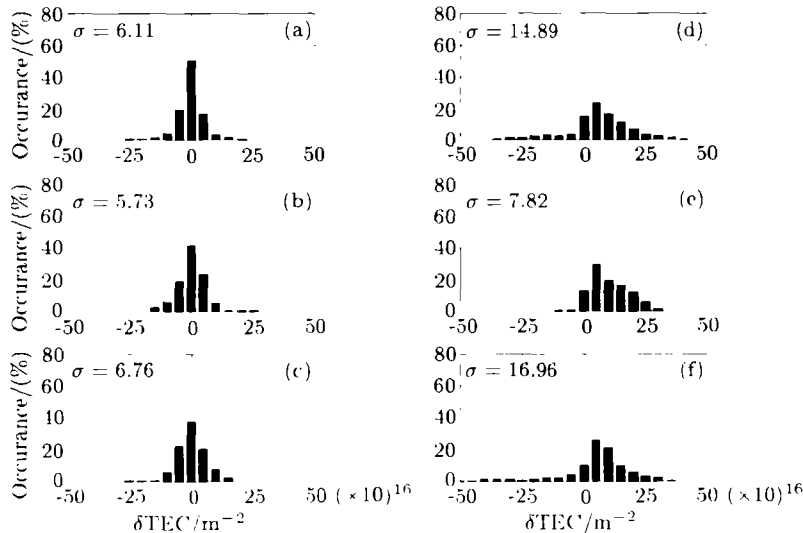


图 6 模式误差 (左) 和 IRI 计算误差 (右) 在冬季 (a)、(d)。

夏季 (b)、(e), 春秋季 (c)、(f) 的统计分析

(图中横坐标表示绝对误差值, 纵坐标表示误差的出现率, 图中的数据表示误差的均方值)

Fig.6 Statistical analysis of errors using model (left) and IRI (right) in winter (a), (d), summer (b), (e), spring and autumn (c), (f) respectively

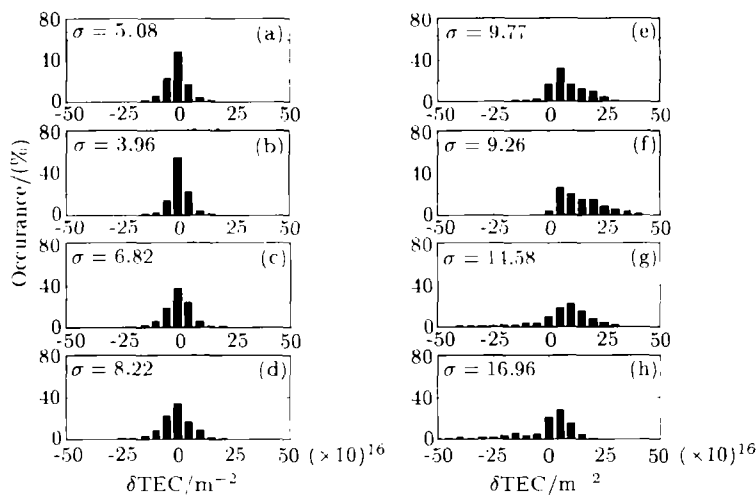


图 7 模式误差 (左) 和 IRI 计算误差 (右) 在夜间 (a)、(e)。

早晨 (b)、(f), 白天 (c)、(g) 和傍晚 (d)、(h) 的统计分析

(图中横坐标表示绝对误差值, 纵坐标表示误差的出现率, 图中的数据表示误差的均方值)

Fig.7 Statistical analysis of errors using model (left) and IRI (right) at night (a), (e), in the morning (b), (f), in the daytime (c), (g) and in the evening (d), (h) respectively

4 结论

本文通过分析武汉电离层观象台 1980 年至 1990 年间一个太阳活动周期 TEC 的数据资料, 得出武汉地区的一个电离层 TEC 的统计经验模式. 该模式采用傅里叶级数展开 TEC 随当地时间的变化, 采用线性函数描述 TEC 随太阳活动参数的变化, 结果能较好地预测武汉地区 TEC 的月中值.

将模式预测值与实际观测结果比较, 得出模式的绝对误差在太阳活动高年较大, 低年较小; 在春秋两季较大, 冬夏两季较小; 在当地时间白天和傍晚较大, 夜间和早晨较小. 此外, 与国际参考电离层模式 IRI 的计算结果相比较, 本文模式预测的武汉地区的 TEC 更接近于实际观测结果.

另外, 在本文的统计分析中初步探讨了 TEC 的半年变化及“冬季异常”现象与太阳活动的关系, 结果表明 TEC 的半年变化在高年低年都存在, 而“冬季异常”只在太阳活动高年出现, 随着太阳活动的减弱, 这种异常现象消失.

电离层 TEC 是电离层物理及电离层电波传播模式理论中的重要参量, 本文建立的武汉 TEC 统计经验模式对研究武汉地区的电离层结构及其变化, 以及许多实际工程中的电波传播修正等均具有重要意义.

参 考 文 献

- [1] 李利斌, 吴振华, 王炳康. 武昌地区急始型磁暴期间电离层电子总含量的变化. 空间科学学报, 1996, 16(2):133—138
- [2] Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F₂-layer. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1998, 60(14):1385—1402
- [3] Huang Yinnien. Solar cycle variation in the total electron content at Segamore Hill. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1978, 40(6):733—739
- [4] 马健敏, 龙其利. 新乡上空电离层总电子含量的经验模式. 空间科学学报, 1992, 12(1):76—79
- [5] 蒋和荣, 杨美华等. 总电子含量的一个统计模式. 空间科学学报, 1993, 13(2):153—158
- [6] 刘选谋, 冯剑舟. 我国中纬地区电离层总电子含量的一个经验模式. 武汉大学学报 (自然科学版), 1994, (1):47—50
- [7] Gulyaeva T L. Regional analytical model of ionospheric total electron content: Monthly mean and standard deviation. *Radio Sci.*, 1999, 34(6):1507—1512
- [8] Zolesi B, Cander Li R, Francesghi G De. On the potential applicability of the simplified ionospheric regional model to different mid-latitude areas. *Radio Sci.*, 1996, 31(3):547—552
- [9] Jiao P N, Wu J. Ionospheric Models and data for the Chinese subcontinent. *Adv. Space Res.*, 1996, 18(6):191—200

A STATISTICAL TEC MODEL BASED ON THE OBSERVATION AT WUHAN IONOSPHERIC OBSERVATORY

CHEN Yanhong WAN Weixing LIU Libo LI Libin

(*Wuhan Institute of Physics and Mathematics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071*)

Abstract

In this paper, an empirical model of ionospheric total electron content (TEC) is obtained by analyzing the TEC data observed at Wuhan Ionospheric Observatory for a solar cycle (from 1980 to 1990). In the model, a linear function was applied to describe the relationship between TEC and solar 10.7 cm flux index, and took Fourier series analysis to investigate the diurnal and semidiurnal variations of TEC over Wuhan. The agreement between the prediction by this TEC model and the observed TEC data at Wuhan is quite satisfactory: the basic trends and the diurnal variations are well reproduced. The overall model prediction error is smaller in the years with low solar activity than in those with high solar activity, smaller in winter and summer than in spring and autumn, and in the morning and at night than in the day time and in the evening. The semiannual of TEC and seasonal anomaly (winter maximum) are also well represented in our TEC model. With the decrease of solar activity, the anomaly is gradually disappeared. In addition, this model is more accurate than International Reference Ionosphere (IRI) model in predicting TEC over Wuhan.

Key words Ionosphere, Ionospheric total electron content, Statistical and empirical model