

余 优, 万卫星, 刘立波等. 全球电离层 TEC 起伏特性分析. 地球物理学报, 2009, 52(9): 2189~2194, DOI: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2009. 09. 001

Yu Y, Wan W X, Liu L B, et al. A global ionospheric TEC perturbation index. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(9): 2189~2194, DOI: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2009. 09. 001

全球电离层 TEC 起伏特性分析

余 优^{1,2}, 万卫星¹, 刘立波¹, 赵必强¹

1 中国科学院地质与地球物理研究所北京空间环境国家野外科学观测研究站, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 利用全球电离层 TEC 地图(GIMs)数据, 在已经建立 TEC 气候学模式的基础上, 计算了 1998 年以来固定 UT 时间的全球 TEC 起伏指数 σ_{DGEC} . 采用偏相关分析方法对 σ_{DGEC} 与太阳活动(F107 指数)及其起伏(dF107)、地磁活动(Ap 指数)、季节变化因子(太阳偏置角)等因素, 以及上述因素的非线性组合等的相关性进行分析, 发现 σ_{DGEC} 与 F107、Ap 指数具有最强的相关性, 与 F107 指数和半年变化因子的交叉项 $F107 \times S$ 、F107 指数的二次方具有较好的相关性, 同时, 与 F107 指数与年变化因子的交叉项 $F107 \times A$ 及 F107 扰动指数偏离值(dF107)的二次方也具有一定的相关性. 据此, 以这些因子作为驱动量, 建立了 σ_{DGEC} 的多元回归模型. 鉴于 σ_{DGEC} 反映全球范围内电离层 TEC 起伏的平均特性, 并与太阳活动 F107 指数、地磁活动 Ap 指数具有良好的相关性, 为此我们建议, 将全球 TEC 相对起伏指数 σ_{DGEC} 作为描述全球电离层扰动状态及电离层天气特征的一个新参量.

关键词 全球电离层起伏指数, 偏相关分析, 太阳活动指数, 地磁活动指数

DOI: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2009. 09. 001

中图分类号 P352

收稿日期 2009-04-08, 2009-09-04 收修定稿

A global ionospheric TEC perturbation index

YU You^{1,2}, WAN Wei-Xing¹, LIU Li-Bo¹, ZHAO Bi-Qiang¹

1 *Beijing National Observatory of Space Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2 *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract The global perturbation index, σ_{DGEC} , of the total electron density (TEC) was estimated from the global ionospheric maps (GIMs) produced by Jet Propulsion Laboratory (JPL). With the use of the Partial Correlation Analysis method we analyze the correlation between the global TEC perturbation index and several other factors such as the solar radio flux at 10.7 cm (F107) and its perturbation (dF107), the geomagnetic Ap index, as well as the seasonal factors. The result reveals that σ_{DGEC} is much correlated with F107 and Ap, it is also correlated with the products of different factors, such as $F107 \times S$, $F107^2$, $F107 \times A$ and dF107². Thus, we choose these factors and their multipliers to create a multiple regression model of σ_{DGEC} . The index σ_{DGEC} may efficiently represent the characteristics of the global TEC perturbation and strongly correlates with the solar activity and the magnetic disturbance. Thus, it is suggested that the global TEC perturbation index σ_{DGEC} be chosen as a new parameter in describing the ionospheric disturbances, especially the state of the space weather in the ionosphere.

基金项目 中国科学院知识创新方向性项目(kzcx2-yw-123)、国家 973 计划(2006CB806306)和国家自然科学基金(40636032)联合资助.

作者简介 余 优, 女, 1985 年生, 2007 年毕业于华北电力大学数理系, 现为博士研究生, 主要从事电离层物理方面的研究.

E-mail: yuyou@mail. igcas. ac. cn

Keywords Global ionospheric perturbation index, Partial Correlation Analysis, Solar activity index, Geomagnetic activity index

1 引言

电离层电子浓度总含量(TEC)是描述电离层形态和结构的一个重要参量. 理论上, TEC 及其时空变化能反映电离层的主要特性, 因此通过探测与分析 TEC 参量, 可以研究不同时空尺度的电离层物理过程, 包括天气尺度和气候学尺度的各种电离层变化性(variability). 应用中, TEC 参量与穿透电离层传播的无线电波的时间延迟和相位延迟密切相关, 因而可用于卫星定位、导航等空间应用工程中的电波传播修正. 建立适当的模式来描述 TEC 参量的时空分布及其扰动变化, 不仅对电离层物理的理论研究具有学术意义, 而且对与之相关的工程应用也具有实用价值.

近年来, Forbes 等人通过对电离层电子浓度峰值的不同尺度起伏特性的统计分析, 发现无论是高频(时间尺度小于 2 天)还是低频(时间尺度在 2 到 30 天之间)的电离层起伏均随地磁活动的增加而增加^[1]. Rishbeth 等人认为, 在电离层 F2 层的逐日变化性(day to day variability)中, 大约 13% 来自地磁活动的贡献^[2]. 最近, 为适应全球卫星导航定位系统(GNSS)的工程需求, 同时满足电离层变化性研究的需要, Jakowski 等人建议利用局部的电离层 TEC 起伏标准差作为一种新的电离层起伏指数(ionospheric perturbation index), 他们同时发现这种新定义的电离层起伏指数值与地磁指数 A_p 有很好的相关性^[3].

本文将对 Jakowski 等人的方法进行改进和推广. 主要是采用全球 TEC 气候学模式¹⁾ 意义下的背景 TEC 值, 来计算面积平均意义下的全球 TEC 起伏标准差, 以这一新的电离层起伏指数代替 Jakowski 定义的指数. 下面首先利用全球 TEC 观测数据及相应的气候学模式计算全球 TEC 起伏的标准差 σ_{DGEC} , 然后利用偏相关分析^[4, 5] 方法分析 σ_{DGEC} 与太阳活动、地磁等相关因素之间的统计关系, 在此基础上, 提出了一个由太阳活动 $F107$ 指数、地磁 A_p 指数等因子驱动的全球 TEC 起伏指数的回归模型. 最后我们建议将全球 TEC 起伏指数 σ_{DGEC} 作为描述全

球电离层扰动状态及电离层空间天气特征的一个新参量, 以用于对电离层变化性研究及相关工程应用.

2 全球 TEC 起伏

利用全球 GPS 台网的观测, 已经生成了 1998 年以来的全球电离层 TEC 地图(Global Ionospheric Maps, 简称 GIMs). 本文采用美国 JPL 的电离层地图^[6, 7], 其提供的经纬度和时间网格点(分辨率为 $5^\circ \times 2.5^\circ \times 2\text{h}$)上的 TEC 数据来自于对全球 100 个 GPS 接收机的 TEC 观测数据的插值(2004 年 5 月 4 日以后 JPL GIM 所使用的台站增至 200 个). 每个 GPS 接收机同时提供 6~8 个观测点的 TEC 测量值, 即在一个固定时刻能同时给出 700 个(或者 1400 个)点的观测值, 从而保证了电离层地图的空间分辨率^[8].

根据上述长时间的观测数据, 采用统计本征模(如经验正交函数 EOF)方法, 已经建立起全球 TEC 气候学模式¹⁾, 来描述全球范围内背景 TEC(或平均情况下的 TEC)的季节变化及太阳活动依赖性. 在此基础上, 本文进一步研究在天气尺度上的全球 TEC 起伏特性. 由于这类电离层起伏的随机性, 我们将采用统计学方法进行描述. 首先, 采用实际观测的 TEC 与模式预测值之间偏差的标准差 σ_{DGEC} 来描述电离层的起伏, σ_{DGEC} 的平方(即方差)定义为

$$\sigma_{\text{DGEC}}^2 = \frac{1}{M} \sum_j \frac{\sum_i^N (\text{TEC}_{i,j}^{\text{obs}} - \text{TEC}_{i,j}^{\text{mod}})^2 \cos\varphi_i}{\sum_i^N \cos\varphi_i}, \quad (1)$$

其中, N 和 M 分别表示沿经向和纬向的网格点个数; $\text{TEC}_{i,j}^{\text{obs}}$ 为网格点的观测值, 来自于 JPL GIM 数据; $\text{TEC}_{i,j}^{\text{mod}}$ 为网格点的模式预测值; φ_i 为地磁纬度, $\cos\varphi_i$ 代表网格点的面积加权因子, 因而上述统计量具有面积加权意义.

本文对 Jakowski 等人的 TEC 起伏指数^[3] 的定义进行了推广. 将 Jakowski 的区域网格划分推广到全球情况, 并注意到了球坐标系下的面积加权问题, 因而(1)式给出的是全球电离层 TEC 起伏参量.

我们由(1)式估算了 1998 年以来的 TEC 起伏指数变化情况, 如图 1a 所示. 为了方便比较, 图 1 也给出了同期的太阳活动 $F107$ 指数(b)、地磁活动

1)Wan W X, Liu L R, Zhang M L, et al. Modeling the global Ionospheric TEC with statistical eigen mode analysis. Submitted to *J. Adv. Space Res.*, 2009

A_p 指数(c)、 F_{107} 与其 81 天滑动平均值的偏离的平方 dF_{107}^2 (d) 的变化趋势. 为了进一步说明全球 TEC 起伏指数 σ_{DGEC} 与太阳活动、地磁活动的关系, 我们还给出了 σ_{DGEC} 随 F_{107} 和 A_p 变化的散点图, 如图 2 所示. 由图 1 和图 2 可以看出, σ_{DGEC} 的变化和

这几个因子有较紧密的联系. 例如, σ_{DGEC} 明显地随着太阳活动、地磁活动的增强而升高; 此外, 由图 1 还可以看出, 这几个因子的时序变化尖峰与 σ_{DGEC} 的尖峰在出现时间上也有较好的对应关系; 最后, 全球 TEC 起伏指数有一定的年变化和半年变化分量.

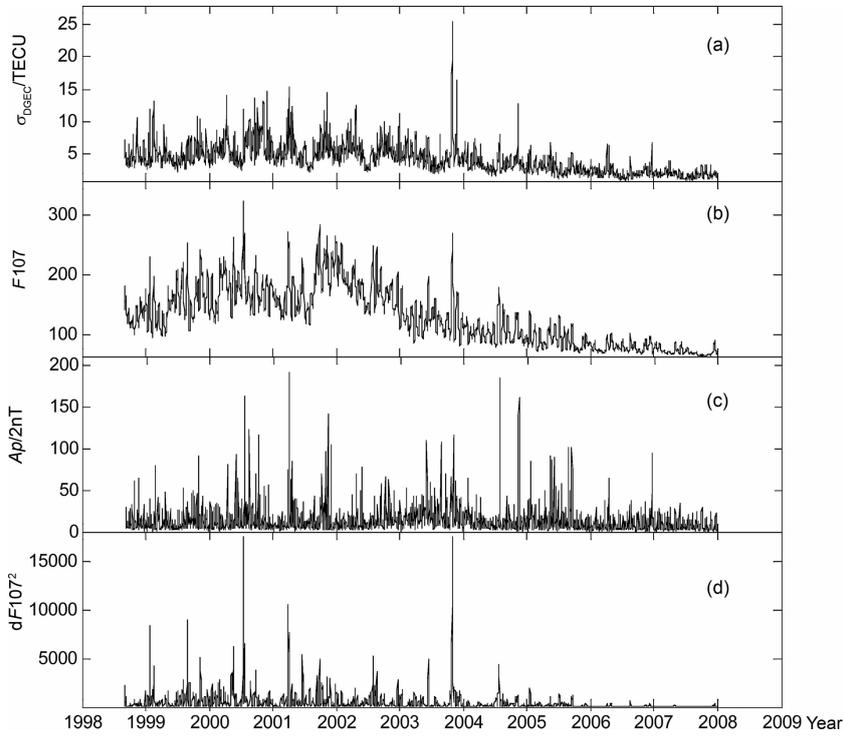


图 1 电离层起伏、太阳活动和地磁活动指数的变化
(a)TEC 起伏指数 σ_{DGEC} ; (b) F_{107} ; (c) A_p ; (d) dF_{107}^2 .

Fig.1 Variations of (a) TEC perturbation index σ_{DGEC} , (b) solar activity index F_{107} , (c) geomagnetic activity index A_p , and (d) square deviation of F_{107} , dF_{107}^2

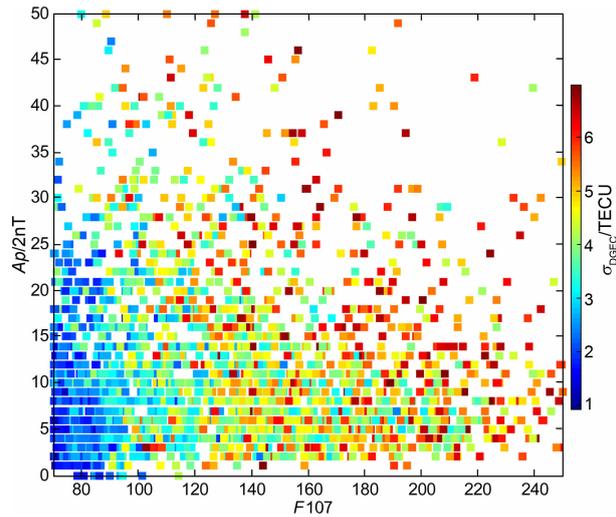


图 2 TEC 起伏指数 σ_{DGEC} 随太阳活动指数 F_{107} 和地磁活动指数 A_p 变化的散点图

Fig.2 Scatter plot of TEC perturbation index σ_{DGEC} versus solar activity index F_{107} and geomagnetic activity index A_p

3 相关分析

3.1 影响因子的初步筛选

Rishbeth 等人^[2] 认为引起电离层变化的可能因素有以下 4 类: (1) 太阳电离辐射, 包括太阳耀斑、太阳 27 天周期、活动区的形成和衰减、日地距离的年变化、太阳活动周变化等; (2) 太阳风及地磁活动, 包括磁暴、行星际磁场或太阳风的分区结构、能量粒子注入、焦耳加热等; (3) 中性大气, 包括潮汐、声重力波、行星波及准两天震荡, 以及地震、火山等; (4) 电动力学, 包括低纬发电机“喷泉”效应、磁层电场的渗透、高纬的等离子体对流等.

在上述 4 类因素中, 一般可以用太阳活动指数如 10.7 cm 太阳射电辐射通量 F_{107} 及其与其滑动平均(F_{107A}) 的偏离 dF_{107} ($dF_{107} = F_{107} - F_{107A}$) 来表述太阳电离辐射; 用地磁活动指数如 A_p 描述

地磁扰动;中性大气及电动力学的效应,目前尚难以指数化,但它们的影响是局域的(非全球性的),因而对全球 TEC 起伏的贡献不显著^[9].但中性大气及电动力学的效应都与季节因素有密切关系,因此我们引入的年变化因子中含有这类影响,这里,年变化因子为 $A(d) = \cos(\omega_0 d)$ 和 $A'(d) = \sin(\omega_0 d)$.此外,我们还通过引入各因子的高次方考虑了其自身的非线性(例如,半年变化因子 $S(d) = \cos(2\omega_0 d)$ 和 $S'(d) = \sin(2\omega_0 d)$,即为年变化因子的二次方),通过引入不同因子之间的乘积考虑了它们的交互作用.

3.2 偏相关分析

通过偏相关分析^[4,5],可以将各因子对 σ_{DGEC} 的独立影响分离出来,并得到 σ_{DGEC} 与该因子独立变化时的相关系数(即偏相关系数).

根据上面关于影响因子的筛选原则,我们初步筛选出 41 个因子(包括非线性项和交叉项).考虑所有的影响因子进行偏相关分析,根据上述偏相关系数的大小,采用逐步剔除法,进一步筛选出用于全球 TEC 起伏指数建模的相关因子.具体方法为:首先,对上述初步筛选出的所有影响因子进行偏相关分析;其次,剔除对 TEC 起伏指数 σ_{DGEC} 的影响贡献最小的因子(偏相关系数最小的),对剩下的因子进行偏相关分析,如此循环,逐步筛选,直到某个因子的删除使复相关系数的相对变化量(前后两次循环的相对偏差)出现突变,如图 3b 所示.

表 1 影响最大的 6 个因子与 TEC 起伏指数 σ_{DGEC} 的偏相关系数及 t 检验值

Table 1 The partial correlation coefficient between the last six influencing factors and TEC perturbation index σ_{DGEC}

影响因子	$F107$	A_p	$F107^2$	$F107 \times A$	$F107 \times S$	$dF107^2$
偏相关系数	0.494397	0.435257	-0.37317	0.34537	-0.37547	0.303377
置信水平	1	1	1	1	1	1

由表 1 可以看出,TEC 起伏指数 σ_{DGEC} 与太阳活动指数 $F107$ 、地磁指数 A_p 显著正相关,因此太阳活动、地磁活动是 TEC 起伏指数 σ_{DGEC} 的主要影响因素.太阳活动的起伏变化会直接影响电离层离子产生率,造成电离层 TEC 的相应变化.当地磁活动比较强时,地球磁层的高能粒子在高纬注入高层大气,能量的增加改变高层大气的温度,并进一步引起大气环流的变化以及固定高度大气密度的变化,特别是改变不同中性成分之间的比例,由此影响电离层离子的产生率、损失率;此外,由于大气环流、中性风和电场作用,这种效应能穿透至中低纬并扩散到全球范围,因而引起全球不同纬度地区不同尺度的

筛选过程中,随着相关因子的减少,复相关系数 R 会有一定程度的下降,其随影响因子数目的变化如图 3a 所示.可以看出,复相关系数 R 在区间 $[0.82942, 0.846846]$ 内变化,随影响因子数量的减少缓慢降低,但变化幅度很小.由此可知循环终止之前每次循环中所剔除的因子对 σ_{DGEC} 模式构建的影响很小,所以,相关因子剔除法是可靠而有效的.

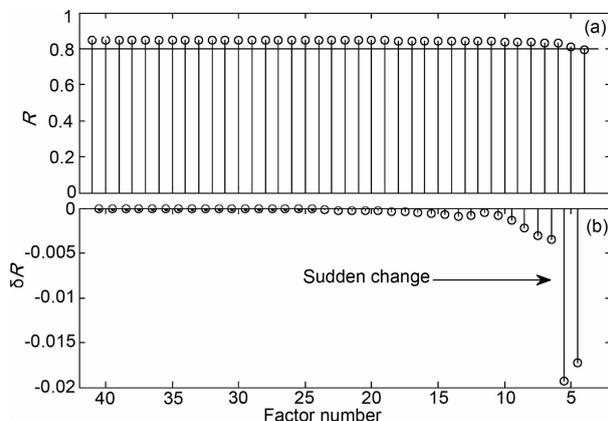


图 3 在逐步剔除过程中复相关系数 R (a) 及剔除每一变量前后复相关系数的改变(b)随影响因子数量的变化情况

Fig. 3 (a) The changes of full correlation coefficient and (b) its deviation after stepwise removing the influence factors

经过逐步筛选,我们最后保留的对 σ_{DGEC} 影响最大的 6 个因子为: $F107$ 、 A_p 、 $F107^2$ 、 $F107 \times A$ 、 $F107 \times S$ 、 $dF107^2$. σ_{DGEC} 与它们的偏相关系数及其置信水平见表 1 所示.

扰动,严重时产生电离层暴,引起全球尺度的 TEC 起伏变化.太阳活动指数 $F107$ 和年变化、半年变化的交叉项与 σ_{DGEC} 也有一定的正相关关系,表明全球 TEC 起伏指数 σ_{DGEC} 存在着一定的年变化和半年变化分量,这一方面是 TEC 的季节变化引起的,另一方面中性大气及电动力学效应对电离层 TEC 的起伏变化也会产生一些年变化与半年变化.

4 分析结果与建模

根据上述相关分析结果,我们进一步采用回归分析,建立由 6 个因子驱动的全球电离层 TEC 起伏

指数的回归模型:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{DGEC}} = & b_0 + b_1 F107 + b_2 Ap + b_3 F107^2 \\ & + b_4 F107 \times A + b_5 F107 \times S + b_6 dF107^2, \end{aligned} \quad (2)$$

其中,回归系数 $b_0 \sim b_6$ 的估算值见表 2 所示.

表 2 回归方程(2)的回归系数

Table 2 The regression coefficients of the regression equation (2)

回归系数	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
估算值	-3.64006	0.08586	0.04178	-0.00021	0.00462	-0.00501	0.00050

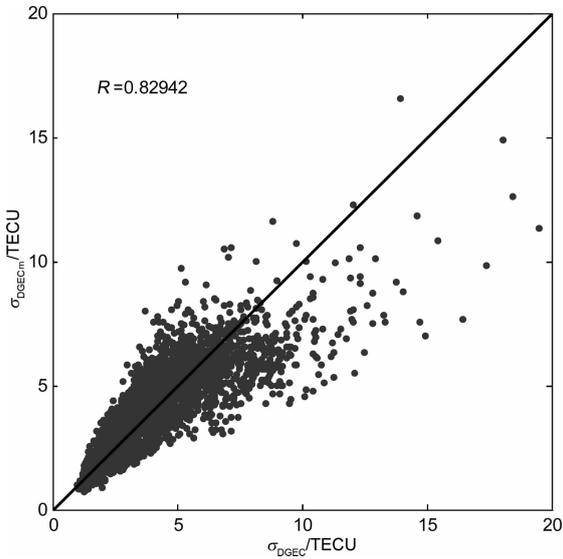


图 4 模式值与观测值比较

Fig. 4 Comparison of the modeled TEC perturbation index σ_{DGECm} and the observed σ_{DGEC}

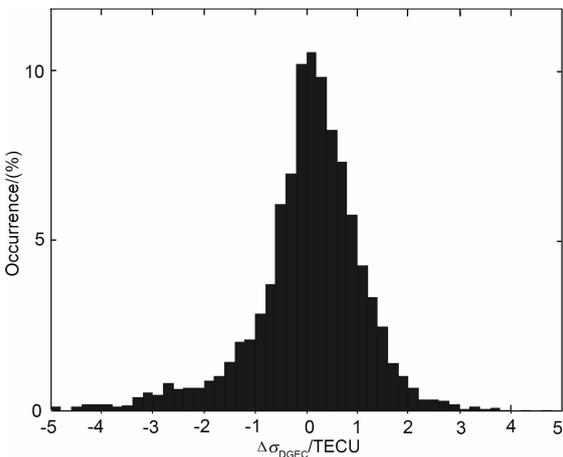


图 5 σ_{DGEC} 回归模型的误差分布

Fig. 5 Histogram of the modeled errors $\Delta\sigma_{\text{DGEC}}$

由回归方程估计的 TEC 起伏指数模式值 σ_{DGECm} 与观测值 σ_{DGEC} 相关关系的散点图见图 4 所示,相应的误差统计直方图见图 5 所示.由图 4 可知,TEC 起伏指数观测值和模式值具有较好的相关性,其相关系数(复相关系数)达到 0.82942,且其置

式绝对误差标准差为 1.22 TECU,具有较高精度.

在分析建模的过程中,我们也曾采用由同一数据源建立的气候学模式的预测 TEC 值替代 Jakowski 等人^[3]采用的月中值来估算 TEC 的相对偏差作为全球 TEC 的相对起伏指数 σ_{RGEC} . 相对起伏指数 σ_{RGEC} 与地磁活动的相关性最强,与 F107 的起伏变化 dF107 也有一定的相关性,但与 F107 本身以及季节变化因子的相关性很弱,这可能有以下两个原因:首先,中性大气及电动力学扰动效应的影响是相对小尺度的,是局域的(非全球性的),因而年变化等季节因子对全球 TEC 起伏的贡献不显著^[9];其次,相对起伏的标准差 σ_{RGEC} 消除了 TEC 本底的影响因而不受年变化等季节变化因子的影响.在实际应用中,相对起伏指数的应用不如绝对起伏指数直接,因而本文中未给出进一步的讨论.

5 结 论

电离层的起伏是空间天气的重要组成部分,对空间天气的研究和应用具有重要意义.本文引入全球 TEC 起伏标准差 σ_{DGEC} 作为描述电离层 TEC 起伏特性的指数,为全球电离层扰动变化提供了一个简单和直观的度量,可以作为研究电离层变化性、预报电离层起伏状态的一个重要指标,也可以用作卫星定位导航等空间应用的保障指标.

本文针对该指数的各个影响因子进行了分析,并在偏相关分析基础上筛选出适合的因子,建立了电离层 TEC 起伏指数的多元回归模型.

参考文献(References)

- [1] Jeffrey M Forbes, Scott E Palo, Zhang Xiao-li. Variability of the ionosphere. *J. Atmos. Sol. -Terr. Phys.*, 2000, **62**:685~693

信度达到了极显著的水平,因此,多元回归模型具有较好的可靠性和有效性.由图 5 可知,在大部分情况下,模式值和观测值的误差 $\Delta\sigma_{\text{DGEC}}$ 小于 1 TECU,模

- [2] Rishbeth H, Mendillo M. Patterns of F2-layer variability. *J. Atmos. Sol. -Terr. Phys.*, 2001, **63**:1661~1680
- [3] Jakowski N, Stankov S M, Schlueter S, et al. On developing a new ionospheric perturbation index for space weather operations. *Advances in Space Research*, 2006, **38**: 2596 ~ 2600
- [4] 徐桂荣, 万卫星, 宁百齐. 用偏相关分析电离层 NmF2 与低层大气等压面高度的相关性. *科学通报*, 2007, **52**(9):1069~1074
Xu G R, Wan W X, Ning B Q. Applying partial correlation method to analyzing the correlation between ionospheric NmF2 and height of isobaric level in the lower atmosphere. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(17):2413~2419
- [5] 余承莉, 万卫星, 徐桂荣. 电离层全球电子总含量的气候学特性分析与经验模式构建. *科学通报*, 2007, **52**(24):2876~2881
She C L, Wan W X, Xu G R. Climatological analysis and modeling of the ionospheric global electron content. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(2):282~288
- [6] Mannucci A J, Wilson B D, Yuan D N, et al. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements. *Radio Sci.*, 1998, **33**(3):565~582
- [7] Iijima B A, Harris I L, Ho C M, et al. Automated daily process for global ionospheric total electron content maps and satellite ocean altimeter ionospheric calibration based on Global Positioning System data. *J. Atmos. Sol. -Terr. Phys.*, 1999, **61**:1205~1218
- [8] Wan W X, Liu L B, Pi X, et al. Wavenumber-4 patterns of the total electron content over the low latitude ionosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, **35**:L12104
- [9] 於 晓. 欧洲上空电离层峰值电子密度逐日变化的相关性研究[硕士论文]. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所, 2007
Yu X. A correlation study of the day-to-day variability of F2-layer peak electron density over Europe [Master's thesis](in Chinese). Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2007

(本文编辑 何 燕)