

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

余承莉 万卫星* 徐桂荣

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 中国科学院研究生院, 北京 100049; 中国科学院武汉物理与数学研究所, 武汉 430071. * 联系人, E-mail: wanw@mail.iggcas.ac.cn)

摘要 利用 120°E 子午线上的 GPS TEC 数据, 计算了 1996~2004 年间的等效电离层全球电子总含量 (GEC). 应用偏相关方法分析了 GEC 与太阳活动指数 $F_{10.7}$, 以年为基频的季节因子之间的相关性, 发现 GEC 与 $F_{10.7}$, 年变化和半年变化因子之间均存在较强的相关性. 据此, 构建了一个由太阳活动指数和季节因子共同驱动的 GEC 经验模式, 并考察了太阳活动指数的修正对建模效果的影响. 结果表明 GEC 的变化主要由太阳活动周变化, 年变化和半年变化 3 种分量构成, 其中太阳活动周变化由太阳活动指数控制, 其变化幅度最大; 年变化与半年变化的幅度也受太阳活动指数调制, 半年变化的幅度略大于年变化幅度. 此外, 经过对比分析, 文中构建的 GEC 经验模型优于 Afraimovich 等人提出的 GEC 经验模型.

关键词 电离层全球电子总含量 电离层气候学 经验模式

电离层是近地空间的一个重要组成部分, 其形态与太阳活动密切相关. 太阳活动引起的 11 a 周期变化以及地球绕太阳公转形成的季节变化是导致地球电离层气候学尺度变化的最重要原因. 电离层电子浓度总含量 (TEC) 作为一个描述电离层形态和结构的重要参量, 早在 20 世纪 60 年代就已被提出来, 并在电离层气候学特性研究中发挥了十分重要的作用 [1~3]. 特别是在全球卫星定位系统 (GPS) 问世以后, 由于 GPS 台站数量多, 分布广, 可以全天候不间断观测, 这为研究大范围 and 全球 TEC 变化提供了极大的便利, 出现了大量的相关研究报道 [4~7]. 这些研究报道指出, TEC 不仅在时间上存在日变化, 半年变化和年变化等季节变化特征; 还在空间上存在地区差异, 比如赤道异常, 海洋与陆地的分布不均导致的地区差异. 如何利用 GPS TEC 的数据优势来考察全球电离层电子浓度总含量的气候学特性, 是一个有意义的课题. 最近, Afraimovich 等人 [8] 利用 JPL, UPC, CODE, ESA 和 EMR 等给出的 1998~2005 年间的全球 TEC MAP 数据, 对全球电离层地图绘制模型 (GIM) 的网格单元上的 TEC 按面积加权积分, 构造了一个新的参量——电离层全球电子总含量 GEC. 文献 [8] 指出, 这个新的参量可以抑制 TEC 的局地特征, 从而突出全球电离层的

整体特性, 因此它比 TEC 更适于研究全球电离层形态变化和动力学过程等. Afraimovich 等人 [8] 在研究中发现, 经过年度平滑后 GEC 与太阳活动有很密切的联系. 据此, 他们建立了一个反映 GEC 与太阳 10.7 cm 射电流量 $F_{10.7}$ 关系的简单的线性回归模型. 然而, 电离层 GEC 的季节变化振幅在不同太阳活动水平年并不一样, Afraimovich 等人 [8] 在他们的 GEC 模型中并没有考虑到这一点, 因此本文的主要目的是对该模型加以改进. 此外, 考察不同 $F_{10.7}$ 替代指数对建模的影响并选取相对较佳的指数来构建 GEC 的经验模式也是本文的研究目的之一.

本文依据 Afraimovich 等人 [8] 的方法, 利用 120°E 子午线上的 GPS TEC 数据求取了等效 GEC, 并对其气候学特性进行了分析. 在利用所得 GEC 数据构建经验模式时, 本文对 Afraimovich 等人 [8] 的 GEC 建模方法进行了改进, 并用偏相关方法 [9] 评估了 $F_{10.7}$ 和各阶季节因子在 GEC 建模中的重要性. 此外, 本文还考察了不同太阳活动指数对建立 GEC 经验模式建模效果的影响, 从而得到了一个相对较佳的 GEC 经验模式. 最后, 本文对 Afraimovich 模型和本文的改进模型的建模效果进行了对比分析.

1 电离层 GEC 及其估算

2007-07-26 收稿, 2007-09-05 接受

中国科学院创新方向性项目 (批准号: KZCX3-SW-144)、国家自然科学基金项目 (批准号: 40636032) 和国家重点基础研究发展计划项目 (批准号: 2006CB806306) 资助

文献[8]中, Afraimovich 计算 GEC 的算法如下:

$$GEC = \sum TEC_{i,j} S_{ij}, \quad (1)$$

其中, $TEC_{i,j}$ 为 GIM 网络上结点 (i, j) 处垂直 TEC 的数值 ($1TECU = 1.0 \times 10^{16} \text{ el} \cdot \text{m}^{-2}$), $S_{i,j}$ 是以结点 (i, j) 为中心的 GIM 网格单元的面积, 这个网格是由经线和纬线构成的二维曲面网, 网格的分辨率沿纬向为 2.5° , 沿经向为 5° .

为了更一般地表达(1)式的物理意义, 我们采用微积分的思想, 并根据球面几何学, 在电离层薄层模型球面上, 将 GEC 表示成地磁坐标系中关于地磁纬度 φ 和地磁经度 λ 的连续函数, 即

$$GEC = R^2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} TEC(\varphi, \lambda, t_0) \cos \varphi d\varphi d\lambda, \quad (2)$$

式中, R 是该球面的半径(取 6771.004 km), $TEC(\varphi, \lambda, t_0)$ 是球面上 (φ, λ) 处 t_0 时刻垂直 TEC 的数值. 为方便与通常 TEC 的比较, 我们选择不同于文献[8]的 GEC 的单位 GECU, 即 $1GECU = 4\pi R^2 TECU = 5.77 \times 10^{30} \text{ el}$, 此时 GEC 在数值上也可理解为 TEC 的全球平均值.

(2)式表明, 计算理论上的 GEC 需要全球的 TEC 数据, 但 GPS 台站在两极分布稀少, 而且在中低纬的分布也极不均匀, 所以有必要采用一定的近似处理. 为此, 考察(2)式中 GEC 沿纬度的分布情况, 定义其分布函数 $L(\varphi)$,

$$L(\varphi) = R^2 \int_{-\pi/2}^{\pi} TEC(\varphi, \lambda, t_0) \cos \varphi d\lambda, \quad (3)$$

用它来表征不同纬度带上的 TEC 积分对 GEC 的贡献.

这样, $GEC = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} L(\varphi) d\varphi$.

图 1 是利用 JPL 发布的 1998~2006 年间的全球 TEC 地图数据计算得到的 $L(\varphi)$ 平均变化曲线, 图中 GEC 表示 $L(\varphi)$ 对 φ 的积分, 其值是 1998~2006 年间 GEC 的平均水平. 从图 1 可见, 磁赤道和中低纬地区

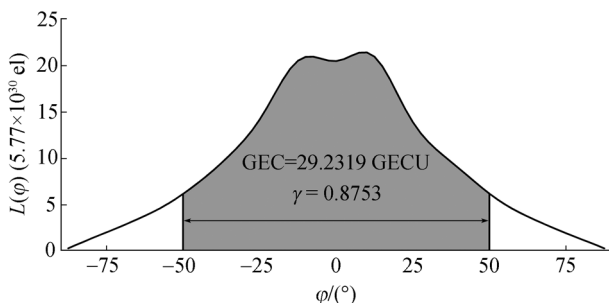


图 1 GEC 沿地磁纬度的分布 $L(\varphi)$ 的 $L(\varphi)$ 积分占 GEC 的绝大部分. 例如, $(-50^\circ, 50^\circ)$ 内的

$L(\varphi)$ 积分对 GEC 的贡献高达 87.53%, 而 $\pm 50^\circ$ 以上的高纬地区的贡献仅占 12.47%. 因此, 当数据中缺乏高纬观测时, 可以用中低纬地区的 TEC 数据得到的部分 GEC(记为 GEC') 除以一个修正因子 γ 来代替 GEC 值, 即

$$\gamma = \frac{GEC'}{GEC} = \frac{\int_{-\varphi_S}^{\varphi_N} L(\varphi) d\varphi}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} L(\varphi) d\varphi}. \quad (4)$$

另外, (2)式中 TEC 沿磁经度的积分, 主要体现为磁地方时的变化. 我们假设磁经度变化的影响不重要, 将(2)式中 TEC 随磁经度的积分等效为随磁地方时的积分. 经过上述处理后, 再将基于部分子午线的 GEC 对面积进行归一化, 此时,

$$GEC = \frac{1}{48\gamma} \int_0^{24} \int_{-\varphi_S}^{\varphi_N} TEC(\varphi, \lambda_0, t) \cos \varphi d\varphi dt. \quad (5)$$

这样, (2)式就简化为(5)式, 它为我们利用相对较少的 TEC 数据来研究全球电离层形态提供了一个可行方案.

2 GEC 的气候学特性分析与模式构建

根据(5)式, 本文利用 120°E 附近磁纬在 $\pm 50^\circ$ 之间的 GPS TEC 数据计算了 1996~2004 年的电离层 GEC(相对精度平均为 7.6%, 最高可达 3.5%), 结果见图 2(b)中的曲线所示, 并把这个计算结果作为 GEC 的观测值. 同时, 为方便比较, 在图 2(a)中给出了同期太阳活动指数 $F_{10.7}$ 的变化情况. 由图 2 可见, 与 TEC 类似, GEC 与太阳活动具有紧密联系, GEC 随太阳活动增强而增大, 随太阳活动的减弱而减小; 其次, GEC 具有明显的年变化和半年变化等时间变化特征, GEC 的变化明显依赖于太阳活动强度的变化.

下面对 GEC 进行模式构建. 首先根据 Afraimovich 的方法 [8], 对本文中的观测 GEC, 用 $F_{10.7}$ 来进行一元线性回归, 得到回归方程: $GEC_m(F_{10.7}) = -2.7704 + 0.2244 \times F_{10.7}$. 图 3(a)给出了此时的模式值与观测值(图 2(b))之间相关关系的散点图. 观测 GEC 和模式 GEC 之间的复相关系数 r_f 为 0.8504, 标准差 σ 为 5.8156 GECU, 相对标准差 RSD 为 24.46%. 从图 3(a)可以看出, 在 GEC 观测值比较小的情况下, 拟合结果是比较满意的, 但是随着观测值的增大, 模式值与观测值之间的偏差也在不断增加. 由于 Afraimovich 等人 [8] 的方法仅用 $F_{10.7}$ 来进行一元线性回归, 并没有考虑到

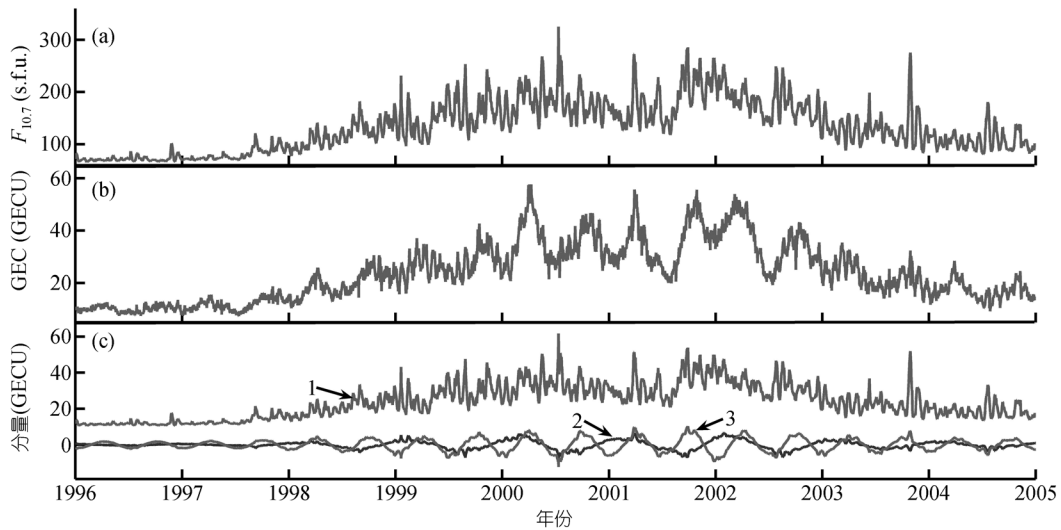


图2 $F_{10.7}$, 观测 GEC 以及模式 GEC 中 3 个分量的变化

图中从上至下为: (a) $F_{10.7}$; (b) 观测 GEC; (c) 模式 GEC 中的 3 个分量, 图中的分量 1, 2, 3 分别表示太阳活动周变化、年变化和半年变化分量

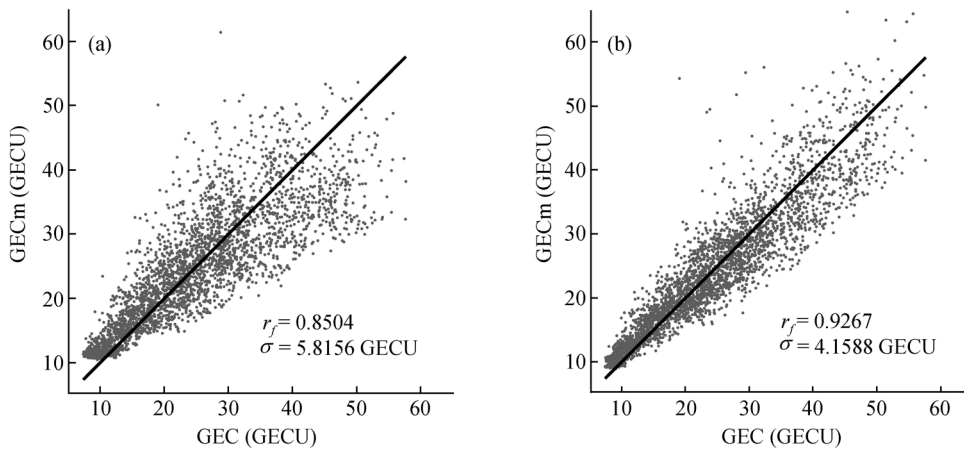


图3 观测 GEC 与拟合 GEC 的比较(分别记为 GEC, GECm)

(a) Afraimovich 方法; (b) 本文方法

GEC 的季节变化因素, 为了更精确地描述 GEC 的气候学特征, 我们有必要对 Afraimovich 的方法进行改进.

一方面为了改进 Afraimovich 的模型, 另一方面也为了考察 GEC 与 $F_{10.7}$ 以及季节变化因子(季节变化因子与每年的天数 d 相关)之间的相关性, 并达到构建基于 $F_{10.7}$ 和季节变化因子的 GEC 经验模式的目的, 我们将 GEC 表示为关于 $F_{10.7}$ 的泰勒级数和关于 d 的傅里叶级数 [10],

$$GEC(F_{10.7}, d) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N F_{10.7}^n(d) \times c_{mn} \cos\left(\frac{2\pi md}{365.25}\right) + \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N F_{10.7}^n(d) \times s_{mn} \sin\left(\frac{2\pi md}{365.25}\right) \quad (6)$$

式中, m 表示谐波阶数(以 365.25 d 为基本周期), n 表示 $F_{10.7}$ 的幂次, c_{mn} 和 s_{mn} 分别表示谐波展开的余弦项与正弦项系数.

我们应用偏相关方法来考察观测 GEC 与(6)式中各阶数项之间的相关情况. 图 4 给出了观测 GEC 与 $F_{10.7}(F)$, 年变化(A), 半年变化(S), 1/3 年变化(T)和 1/4 年变化(Q)之间的偏相关系数 r_p 及置信度, 图中横坐标上的各项含义如下:

$A1(d) = \cos(\omega_0 d)$	$A1F(d) = F_{10.7} \times \cos(\omega_0 d)$
$A2(d) = \sin(\omega_0 d)$	$A2F(d) = F_{10.7} \times \sin(\omega_0 d)$
$S1(d) = \cos(2\omega_0 d)$	$S1F(d) = F_{10.7} \times \cos(2\omega_0 d)$
$S2(d) = \sin(2\omega_0 d)$	$S2F(d) = F_{10.7} \times \sin(2\omega_0 d)$
$T1(d) = \cos(3\omega_0 d)$	$T1F(d) = F_{10.7} \times \cos(3\omega_0 d)$

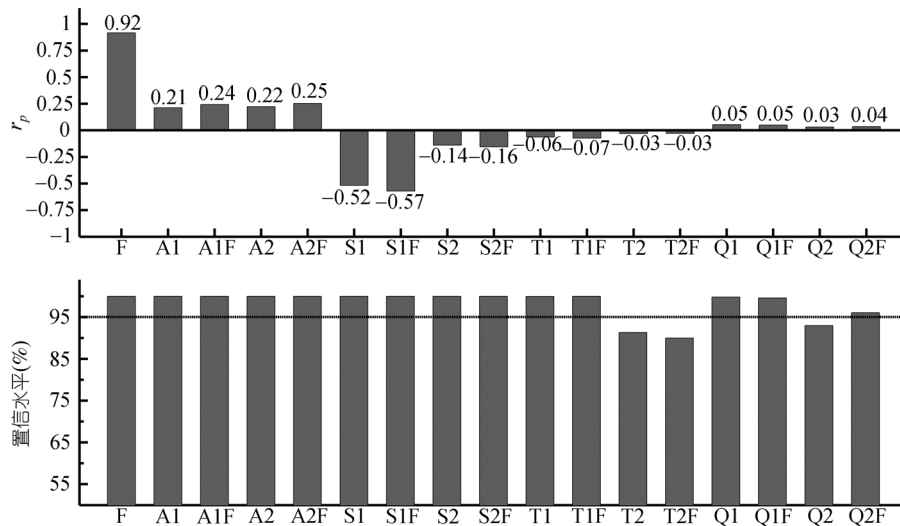


图 4 GEC 与其建模因子的偏相关系数 r_p 及置信度

$$\begin{aligned}
 T2(d) &= \sin(3\omega_0 d) & T2F(d) &= F_{10.7} \times \sin(3\omega_0 d) \\
 Q1(d) &= \cos(4\omega_0 d) & Q1F(d) &= F_{10.7} \times \cos(4\omega_0 d) \\
 Q2(d) &= \sin(4\omega_0 d) & Q2F(d) &= F_{10.7} \times \sin(4\omega_0 d)
 \end{aligned}$$

其中, 基频 $\omega_0 = 2\pi/365.25$.

从图 4 可以看到, 除 1/3 年变化中的 T2 和 T2F 以及 1/4 年变化中的 Q2 外, GEC 与 $F_{10.7}$ 以及季节变化因子的偏相关系数的置信度都超过了 95% (图 4 中虚线所示), 可见 GEC 与这些因素都有着不同程度的相关性. 从偏相关系数来看, GEC 和 $F_{10.7}$ 的偏相关系数最高, 这说明 GEC 主要受太阳活动的控制; 在季节变化因子中, 年变化和半年变化因子与 GEC 的偏相关系数较大, 但相对于 $F_{10.7}$ 要小一些, 年变化和半年变化因子可以作为次要因素考虑到 GEC 的建模中去, 以表征 GEC 的季节变化特性. 而 1/3 年变化和 1/4 年变化因子与 GEC 的偏相关系数 (其绝对值均小于 0.1) 则相对微小, 因此在建模中可以略去这些项. 这样, 在 GEC 模式 (6) 式中, 参数 M, N 可分别取为 2 和 1. 实际上, 电离层参量通常在低纬和赤道地区呈现出明显的半年变化, 而在中高纬地区则表现出显著的年变化. 其中最显而易见的原因就是太阳在一年内两次跨越赤道上空, 给赤道地区电离层和背景大气带来了非常明显的半年变化信息, 而对中高纬地区来说则引入了显著的周年变化信息 [14]. 而 GEC 作为一个描述电离层全球电子总含量的电离层参量, 就不可避免地包括相应的年变化和半年变化分量, 图 4 的偏相关分析结果也正说明了这一点.

为了进一步对比模型阶参数 N 和 M 的取值对建

模效果的影响, 我们对 (6) 式采用多元线性回归方法来拟合 GEC, 图 5 给出了 N 从 0~2, M 从 0~4 时, 模式 GEC 与观测 GEC 之间的复相关系数 r_f 和标准差 σ 的变化情况. 由图可见, 当 N 一定, M 增大到 2 时, r_f 和 σ 即趋于平稳, 表明季节因子只需取年变化和半年变化两项即可; 此时, 当 N 取到 1 时, r_f 和 σ 即趋于平稳, 说明 $F_{10.7}$ 只需取一阶. 这与前面的偏相关分析所得结果一致. 因此, 我们在 GEC 建模中取 $N=1, M=2$, 此时, $r_f = 0.9267, \sigma = 4.1588$ GECU, $RSD = 17.49\%$, 图 3(b) 给出了相应的模式估计值与观测值 (图 2(b)) 之间相关关系的散点图. 对比图 3(a) 和 (b) 可以看出, 本文模型的复相关系数要远大于 Afraimovich 模型, 而且本文模型的标准差也比 Afraimovich 模型的小很多, 这说明引入年变化分量和半年变化分量可以明显地改善建模效果.

根据上述方法建立的 GEC 经验模式, 可以将 GEC 分解为太阳活动周变化, 年变化和半年变化 3 个分量, 示意如图 2(c). 从中可见, 太阳活动周变化分量的数值最大, 对 GEC 建模起主要作用; 年变化和半年变化分量的数值都远小于太阳活动周变化分量的数值, 并受太阳活动的明显调制; 半年变化分量的变化幅度略高于年变化分量的变化幅度.

实际上, 电离层参量变化主要受太阳超紫外辐射 (EUV) 的影响, 但 $F_{10.7}$ 仅在 11 年周期上与 EUV 通量相似, 两者在日变化和月变化上存在相当大的差距 [12]. 因此, 我们就 GEC 经验模式的外部驱动量的改进问题做了一些探讨. 我们分别试用 $F_{10.7}$ 的 81 d 滑动平均

值 $F_{10.7A}$ 及 $F_{10.7A}$ 与 $F_{10.7}$ 的平均值 $F_{10.7P}$ ^[13-15]作为之前确立的GEC经验模式中 $F_{10.7}$ 的替代指数,考察3种情况下的建模效果,表1列出了这3种情况下得到的模式GEC与观测GEC之间的复相关系数 r_f 和标准差 σ .此外,为了将本文改进的建模方法与Afraimovich等人^[8]的建模方法做进一步的对比评估,我们将该模型所对应的复相关系数 r_f 和标准差 σ 也在该表中一并列出.从表1可以看到,Afraimovich模型明显不如本文的3种模型,因为其复相关系数最小,标准差最大.在这三种改进模型中,当采用 $F_{10.7A}$ 替代 $F_{10.7}$ 建模时, r_f 由0.9267增大到0.9620,而 σ 由4.1588 GECU下降到

3.0229 GECU;而采用 $F_{10.7P}$ 建模时, r_f 达到最大值0.9653, σ 则降至最小值2.8915 GECU,RSD也从17.49%下降到12.16%.可见,本文对Afraimovich方法和 $F_{10.7}$ 替代指数的改进都收到了显著的成效.

为了进一步说明 $F_{10.7P}$ 的建模效果,我们给出了此时的模式值与观测值之间相关关系的散点图(图6(a))和相应的误差统计分布直方图(图6(b)).对比图6(a)与图3,可以明显看出,图6(a)中模式值与观测值之间的相关性最好,其相关系数(表1中的复相关系数)也是所有模型中的最大值.同时,图6(b)说明误差

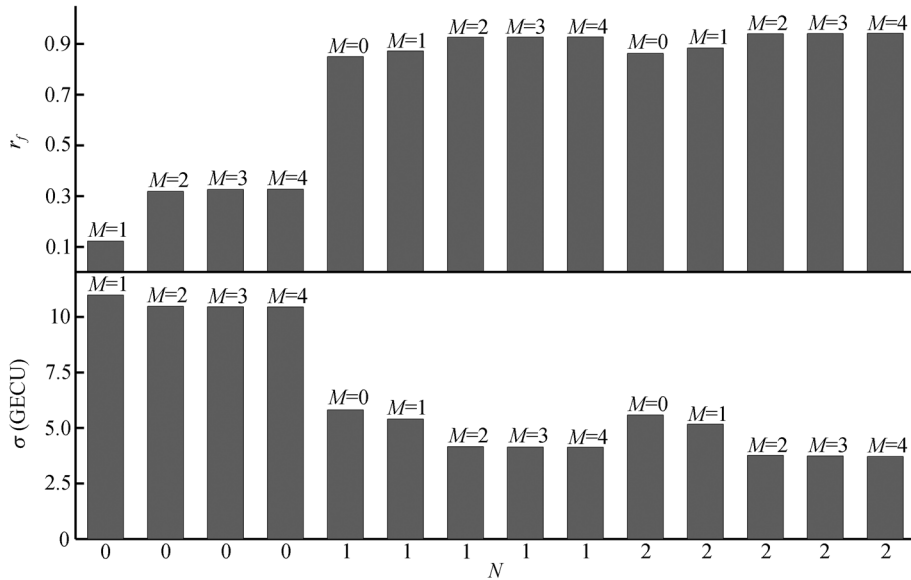


图5 N, M 变化时观测GEC与模式GEC之间的复相关系数 r_f 和标准差 σ

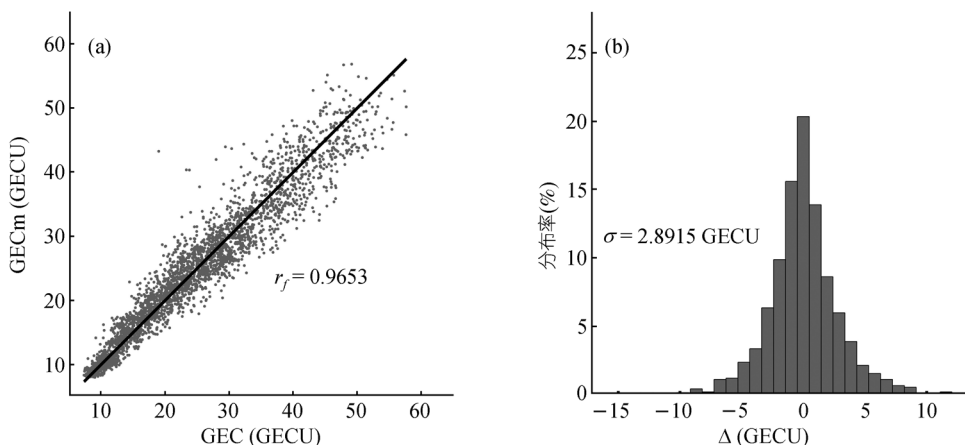


图6

(a) 拟合GEC与观测GEC的比较(用 $F_{10.7P}$ 建模); (b) 误差统计分布直方图, Δ 指误差

表 1 Afraimovich 模型与本文用 $F_{10.7}$, $F_{10.7A}$ 和 $F_{10.7P}$ 建模时 r_f , σ 和 RSD 的对比

	Afraimovich 模型	$F_{10.7}$	$F_{10.7A}$	$F_{10.7P}$
r_f	0.8504	0.9267	0.9620	0.9653
σ (GECU)	5.8156	4.1588	3.0229	2.8915
RSD (%)	24.46	17.49	12.72	12.16

差呈正态分布, 相对标准差 RSD 仅 12.16%, 这又优于其他模型. 可见, 用 $F_{10.7P}$ 替代 $F_{10.7}$ 来表征太阳活动对电离层的影响, 可以显著提高 GEC 建模的精度, 取得最优的建模效果.

3 结论

本文介绍了一种利用区域电离层 TEC 数据求取等效 GEC 的算法, 它为我们利用有限的 GPS TEC 数据来研究全球电离层形态提供了一个可行方案. 本文依据此算法用 120°E 子午线上中低纬地区的 TEC 数据估算了等效 GEC, 并对其气候学特性进行了分析. 在偏相关分析的基础上, 本文用 $F_{10.7}$ 指数和季节变化因子通过泰勒级数和傅里叶级数展开的方法建立了一个 GEC 经验模式, 并考察了 $F_{10.7}$ 指数的修正对建模效果的影响. 得到主要结果如下:

() GEC 的气候变化主要由太阳活动周变化, 年变化和半年变化 3 种分量构成, 其中太阳活动周变化分量受太阳活动指数控制, 该分量数值最大; 年变化与半年变化分量的数值远小于太阳活动周变化分量的数值, 并且受太阳活动指数调制; 半年变化分量的变化幅度略高于年变化分量的变化幅度.

() 本文模型由于引入了年变化和半年变化分量, 其建模效果比 Afraimovich 模型有较大的改善.

() 在用 $F_{10.7}$, $F_{10.7A}$ 以及 $F_{10.7P}$ 分别构建 GEC 经验模式时发现, $F_{10.7P}$ 所对应的建模效果最好, 其预测值与观测值之间的相关系数高达 0.9653, 相对标准差仅 12.16%.

致谢 美国国家大气科学研究中心雷久候博士对本文提出了许多中肯的意见, 中国科学院地质与地球物理研究所乐新安、乐会军和骆遥同学对本文的修改也提出了宝贵意见, 在此表示衷心感谢. 作者还要感谢美国喷气动力学实验室

JPL, 因为他们在网上发布了 1998 年至今的全球 TEC 地图模型数据.

参 考 文 献

- 1 Titheridge J E, Buonsanto M J. Annual variations in the electron content and height of the F layer in the northern and southern hemispheres, related to neutral composition. *J Atmos Terr Phys*, 1983, 45(10): 683—696[DOI]
- 2 Jee G, Schunk R W, Scherliess L. Analysis of TEC data from the TOPEX/Poseidon mission. *J Geophys Res*, 2004, 109, A01301, doi: 10.1029/2003JA010058[DOI]
- 3 Mendillo M, Huang C L, Pi X Q, et al. The global ionospheric asymmetry in total electron content. *J Atmos Solar Terr Phys*, 2005, 67: 1377—1387[DOI]
- 4 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[DOI]
- 5 Breed A M, Goodwin G L, Silby J H. Total electron content measurements in the southern hemisphere using GPS satellites, 1991 to 1995. *Radio Sci*, 1998, 33(6): 1705—1726[DOI]
- 6 张东和, 萧佐. 利用 GPS 计算 TEC 的方法及其对电离层扰动的观测. *地球物理学报*, 2000, 43(4): 451—458
- 7 熊波. GPS 信标在电离层研究中的若干应用. 硕士学位论文. 武汉: 中国科学院武汉物理与数学研究所, 2006. 21—39
- 8 Afraimovich E L, Astafyeva E I, Zhivetiev I V. Solar Activity and Global Electron Content. *Doklady Earth Sci*, 2006, 409A(6): 921—924[DOI]
- 9 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
- 10 陈艳红, 万卫星, 刘立波, 等. 武汉地区电离层电子浓度总量的统计经验模式研究. *空间科学学报*, 2002, 22(1): 27—35
- 11 余涛. 中低纬电离层电场的模拟研究及电场对电离层年度变化的影响. 博士学位论文. 武汉: 中国科学院武汉物理与数学研究所, 2003. 50—58
- 12 Liu L B, Wan W X, Ning B Q. Statistical modeling of ionospheric f_oF_2 over Wuhan. *Radio Sci*, 2004, 39, RS2013, doi: 10.1029/2003RS003005[DOI]
- 13 Hinteregger H E, Fukui K, Gilson B R. Observational, reference and model data on solar EUV, from measurements on AE-E. *Geophys Res Lett*, 1981, 8(11): 1147—1150[DOI]
- 14 Richards P G, Fennelly J A, Torr D G. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations. *J Geophys Res*, 1994, 99(A5): 8981—8992[DOI]
- 15 Liu L B, Wan W X, Ning B Q, et al. Solar activity variations of the ionospheric peak electron density. *J Geophys Res*, 2006, 111, A08304, doi: 10.1029/2006JA011598[DOI]