

姚璐, 张学民, 余涛. 2014. 中国区域电离层 TEC 与月均值偏差的空间相关性研究. 地球物理学报, 57(11):3600-3610, doi:10.6038/cjg20141113.

Yao L., Zhang X M., Yu T. 2014. A study of spacial correlation of monthly mean deviation of ionospheric TEC over China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(11):3600-3610, doi:10.6038/cjg20141113.

# 中国区域电离层 TEC 与月均值偏差的空间相关性研究

姚璐<sup>1</sup>, 张学民<sup>1</sup>, 余涛<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

<sup>2</sup> 国家卫星气象中心, 北京 100081

**摘要** 本文利用美国喷气动力实验室(JPL)提供的电离层总电子含量(TEC)的地图网格产品, 计算了中国区域上空电离层 TEC 与月均值偏差及其空间相关系数矩阵, 从而分析了 TEC 与月均值偏差空间相关性的分布特征, 根据统计学中定义的相关距离提取了这种偏差在经、纬度方向上的空间特征尺度. 并以 2008 年和 2011 年为例, 着重考察了 TEC 月偏差的空间特征尺度与太阳活动水平、地磁条件和季节变化之间的关系. 结果发现, TEC 与月均值偏差的空间相关性呈现椭圆形高斯分布的特征, 沿纬线方向的特征尺度大于沿经线方向, 不同纬度区域偏差的空间相关性特征差异明显, 高纬的特征尺度在两个方向上均小于低纬, 而不同经度区域在相同地方时条件下表现差异不大; 两个方向的特征尺度在白天、太阳活动水平高和地磁活动剧烈时均存在增大的现象.

**关键词** 电离层; TEC; 背景场; 空间变化; 特征尺度

doi:10.6038/cjg20141113

中图分类号 P352

收稿日期 2014-05-18, 2014-11-09 收修定稿

## A study of spacial correlation of monthly mean deviation of ionospheric TEC over China

YAO Lu<sup>1</sup>, ZHANG Xue-Min<sup>1</sup>, YU Tao<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

<sup>2</sup> National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

**Abstract** Using the the ionospheric total electron content (TEC) map grid products provided by the Jet Propulsion Laboratory (JPL), we calculate the deviation of the TEC to the monthly-averaged TEC over China. Spatial correlation coefficient matrix of the deviation is also calculated to analyze its distribution characteristic. According to the definition of correlation distance in statistics, we extract the spatial characteristic scales in the zonal and meridian directions. Taking the example of 2008 and 2011, we further analyze the dependence of such spatial characteristic scales on the aolar activity level, geomagnetic conditions, and seasons. The results show that the spatial correlation approximately obeys the elliptic Gaussian distribution; the spatial characteristic scale in the zonal direction is larger than that in the meridian direction; the spatial correlation

**基金项目** 国家自然科学基金(D041002 电离层资料同化中的背景场误差特征分析研究)资助.

**作者简介** 姚璐, 女, 1989 年生, 2014 年毕业于中国地震局地震预测研究所, 主要从事电离层物理和地震电离层等方面的研究.

E-mail: chengkelu@sina.com

\* 通讯作者 余涛, 男, 1975 年生, 国家卫星气象中心研究员, 主要从事电离层物理等方面的研究. E-mail: yutao@cma.gov.cn

characteristics change significantly with the latitude; the scales at high latitudes is smaller than those at low latitudes in both directions; the areas with the same local time but different longitudes have little differences; the characteristic scales in both directions tend to be larger when it's in the daytime, of high solar activity level, and in high intense magnetic activity.

**Keywords** Ionosphere; TEC; Ambient field; Space variation; Characteristic scale

## 1 引言

电离层是地球高层大气中被部分电离的区域,其下与地球中性大气相接,上与磁层相连,由于电离层物理性质和位置的特殊性,它同时受到太阳活动、地磁活动的直接影响(熊年禄等,1999). 电离层复杂的物理化学过程和高度动态、开放的系统结构决定了电离层不仅具有规则的周期性变化(气候学变化),同时还存在很多无规律的变化过程(天气学变化)(张奇伟等,1995). 这些不同尺度的变化不仅体现了电离层内在物理化学过程,还反映了电离层对外界环境的响应,研究这些尺度的变化对电离层基础理论和相关技术的发展具有重要意义(袁运斌,2002).

随着探测手段的不断发展,人类的空间活动逐渐增加,通信、导航等应用领域对电离层环境状态和变化的估计以及预测能力的要求越来越高(袁运斌,2002). 然而,长期以来,人们单独地利用电离层观测和模式手段根本无法再现一个准确可靠的电离层环境状态,这与实际应用需求相比相差甚远(吴小成,2008;郭鹏,2006;何茂盛,2011). 为了解决这一难题,在气象和海洋研究中发展出的资料同化实况分析技术被引入到电离层领域,同化技术能够同时利用多种观测资料和模式背景场信息,综合分析反演得到一个“统计最优”的物理状态,不仅满足实况应用需求,还能预测提供一个较为准确的初始场. 电离层观测数据的快速增加和模式的逐步完善为电离层资料同化技术的应用提供了有力的保证.

经过几十年的研究,国内外学者在电离层资料同化方面都取得了一定的成果. Howe 等(1998)根据电离层电子浓度经验模型,利用 GPS 观测数据通过 kalman 滤波算法对电离层电子浓度进行了最优估计;Angling 和 Cannon(2004)利用 PIM 模型作为背景场,对掩星观测资料进行了同化分析,得到了电子密度的三维结构;Schunk 等(2004)发展了基于 Kalman 滤波同化技术的资料同化分析系统;徐继生等(2005)结合 GPS 台网和掩星观测资料反演了

三维的电子浓度;余涛等(2011)在同一观测地点利用 GPS 和测高仪数据反演了电离层垂直廓线,据此构建了一个基于 Kalman 滤波的三维电离层资料同化分析系统,并利用该同化分析系统研究了低仰角 GPS 数据反演电离层 TEC 误差特征. 在这些同化过程中,相关尺度经常以常数参数的形式参与同化过程,准确的相关尺度数据能够保证更优的同化结果,如何得到较为准确的相关尺度显得尤为重要.

在数据同化试验和实际分析中,通常定义采用的模型或预测值为背景场,通过分析背景场和真实值的偏差得到背景误差的空间分布特征,即同化公式中的背景误差协方差,它决定了观测数据对背景场的修正程度,对同化结果的准确性有重要影响. 在早期的探索中,为了简化背景场的复杂程度,主要对电离层逐日变化进行了分析,於晓(2007)利用全球电离层观测台网资料,研究了欧洲上空电离层  $F_2$  层峰值电子密度逐日变化的统计相关性,探讨了这种相关性随地磁活动、太阳活动和季节的变化;Cander(2006)也利用 GPS 数据分析了欧洲上空电离层  $f_oF_2$  和 TEC 在平静期和扰动条件下的空间相关性;但是,实际研究发现电离层背景场误差的结构特征并不象之前的假设为“各向同性”,其在近似南北和东西方向上具有不同的相关尺度(Bust et al., 2004;乐新安,2008;庄照荣,2004),Bust 等(2004)在发展基于三维变分的电离层数据同化方案时,就着重考虑了观测误差和背景场误差带来的影响,认为背景误差结构呈椭圆形高斯分布,并据此对同化方案进行了修正;乐新安(2008)为了能够在同化过程中使用较为准确的误差协方差模型,利用 GPS 数据和后向散射雷达资料分析了电离层日变化的空间相关性,分别探讨了电离层中纬度经向、纬向和垂直方向的相关性.

以上的研究主要针对全球范围和欧洲区域的电离层逐日变化展开,且没有对不同经纬度情况分别进行探讨,为了进一步了解电离层各种变化过程的相关特征尺度,更好地构建电离层背景误差协方差,为针对特定背景场误差结构的分析和建模提供参考,从而最终改善电离层资料同化、尤其是在中国地

区开展的电离层同化试验的精度,本文对中国区域的电离层 TEC 背景误差及其空间相关特征进行了分析研究.首先利用月均值代替背景场,考察电离层实测值与月均值偏差的空间相关性,文中采用连续的电离层 GPS TEC 数据资料进行了一次探索性分析,通过计算电离层背景场空间变化经向和纬向的特征尺度,总结了背景场空间变化的主要特征,并着重探讨了特征尺度与太阳活动、地磁活动及季节变化等因素之间的关系.

## 2 数据及分析过程

电离层总电子含量(TEC)是表征电离层形态特征的重要指标,能够通过 GPS 观测信号反演获得,是目前电离层研究中最受关注的参量之一.本文主要采用了 IGS 服务中心网站美国喷气动力实验室(JPL)提供的全球电离层 GPS TEC 地图(GIM)数据,该数据利用全球连续 GPS 站点的观测资料通过双三次样条函数拟合得到,每两小时反演生成一张全球电离层 TEC 地图,其空间分辨率为  $2.5^{\circ} \times 5^{\circ}$ ,该地图数据经过了一定的数据插值和平滑处理,过滤了较小时空尺度上的电离层扰动,均匀地分布在全球格网点上空,在时间和空间上具有较高的连续性,适合进行稍大尺度的电离层参量背景结构和变化特征研究.

在此次探索性研究过程中,我们分别选择了 2008 年和 2011 年中国区域内数据展开电离层 TEC

背景场空间变化特征尺度的分析.图 1 给出了 2008 年 1 月 1 日 00UT 时刻研究区域内的 TEC 空间分布状态,其数据覆盖范围为  $70^{\circ}\text{E}-140^{\circ}\text{E}, 0^{\circ}-55^{\circ}\text{N}$ ,涉及中低纬区域,跨越了 5 个时区.

根据上述数据的特点及前人的相关研究经验(余涛等,2011;於晓等,2007;Cander,2006;Bust et al.,2004;乐新安,2008;庄照荣,2004;Gail et al.,1993;王勇等,2011),本文采取统计学上常用的协方差和相关系数进行格网点之间相关性的描述.将图 1 中研究区域内各格网点视为研究站点,为了研究的方便,采用月均值作为背景参考场,分别对每个月的 TEC 背景场空间变化情况进行考察,假设某一格网点变量为  $N_i(t)$ , $t$  为日期序列, $i$  为格网点序号,具体数据处理过程如下:

(1) 利用实测数据计算 TEC 的扰动误差,即相对电离层背景状态的偏离程度:  $dN_i(t) = N_i(t) - \bar{N}_i$ ,其中  $dN_i(t)$  为格网点号  $i$  处在第  $t$  天的扰动误差, $\bar{N}_i$  为格网点号  $i$  处的月均值;

(2) 针对月均值,每天都形成一个误差矩阵,为了进行协方差和相关系数的计算,需要将(1)中计算得到的各天的误差矩阵(图 2a)进行合并整理,得到一个完整的月误差矩阵(图 2b);图 2a 中灰色表格代表一天的误差扰动,其空间分布与图 1 类似,将其整理到图 2b 中为一行向量,其中  $M$  为格网点的总个数, $d$  为每月的天数;

(3) 基于合并整理后得到的月误差矩阵,利用协方差计算公式建立各格网点之间的协方差矩阵:

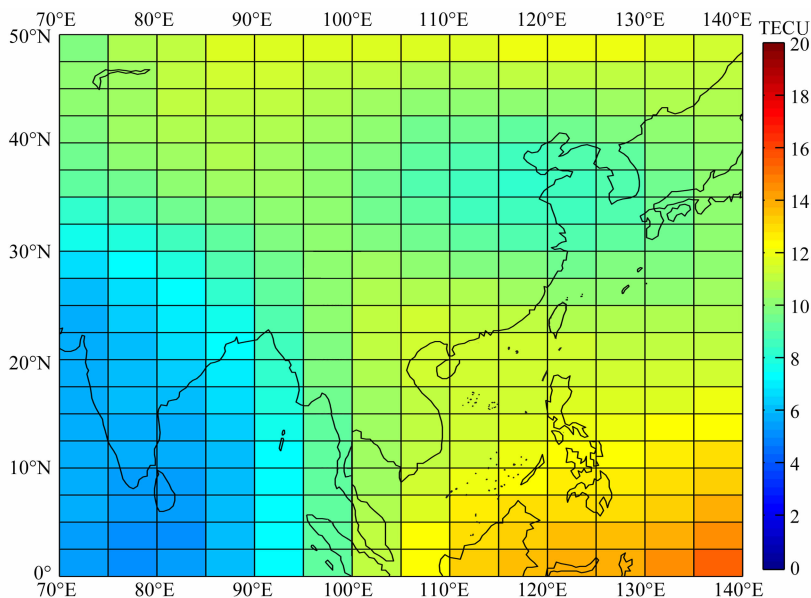


图 1 2008 年 1 月 1 日 00UT 时刻研究区域内 TEC 空间分布

Fig. 1 TEC spatial distribution of the study area at 00UT on January 1, 2008

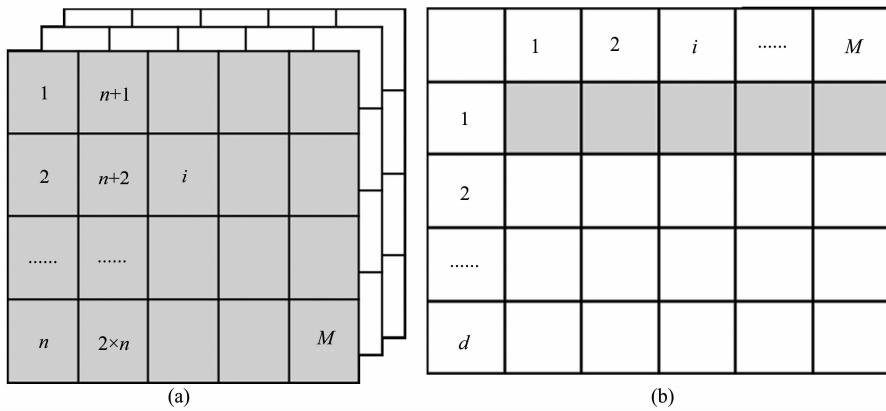


图 2 研究区域内误差矩阵的合并整理过程

Fig. 2 Process of combining the error matrix within the study area

$Cov = \mathbf{D}(\mathbf{D})^T / (M - 1)$ ,  $D_i(t) = dN_i(t) - \overline{dN_i}$ , 其中  $\overline{dN_i}$  为格网点号  $i$  处的扰动误差的月均值,  $D_i(t)$  为格网点号  $i$  处在第  $t$  天的扰动误差偏离平均状态的程度,  $\mathbf{D}$  为某月各格网点处  $D_i(t)$  组成的矩阵,  $Cov$  为协方差矩阵;

(4) 根据协方差矩阵计算各格网点之间的相关系数:  $R_{i,j} = \frac{Cov_{i,j}}{\sqrt{Cov_{i,i}Cov_{j,j}}}$ ,  $R_{i,j}$  和  $Cov_{i,j}$  分别为格网点  $i$  与  $j$  之间的相关系数和协方差;

(5) 仅考虑格网点之间的相对位置, 提取格网点间的经纬度差与相关系数数据, 利用双高斯分布函数

$$y = a_1 e^{-\left(\frac{x_1 - b_1}{c_1}\right)^2} a_2 e^{-\left(\frac{x_2 - b_2}{c_2}\right)^2}, \quad (1)$$

针对经向和纬向分别进行拟合, 其中  $y$  为相关系数,  $x_1$  和  $x_2$  分别为格网点间的经度差和纬度差,  $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2$  分别为拟合系数,  $b_1, b_2$  实际意义中代表均值,  $c_1, c_2$  为标准差(刘西陲等, 2010), 由设定的拟合函数及表 1 提供的相关系数与特征尺度之间的对应关系分别计算得到经纬度两个方向上的相关尺度。

表 1 相关系数划分

Table 1 The division of coefficient

相关系数	0.3	0.5	0.7	0.85
相关程度	微弱相关	低度相关	中等相关	高度相关

(6) 在本文中, 需要针对不同经纬度方向进行分析, 因此我们利用拟合公式计算了两个方向上的独立特征尺度, 选取相关系数为 0.8 且经度差为 0 或纬度差为 0 的情况, 分别得到对应的沿经线或沿纬线方向的相关距离。

### 3 相关距离计算实例

以中国区域 2008 年 1 月正午时刻为例, 根据以上实施过程计算该条件下沿经度方向和纬度方向的相关距离. 图 3 给出了此时刻中国区域各站点平均相关系数与经纬度差的线性拟合曲面, 由图中可以看出, 在一定范围内, 经纬度差越小, 相关系数越大, 当超过这个范围后, 相关系数与经纬度差的关系则不再具有规律性变化。

根据图 3 示意, 当  $dlon$  和  $dlat$  超过  $35^\circ$  时, 相关系数随  $dlon$  和  $dlat$  的增大出现异常增加的情况, 这种现象在地理学上称为截断, 并认为在截断距离外的空间变量的相关性可不予考虑, 因此设置截断距离为  $35^\circ$ , 分别从经度方向和纬度方向对公式(1)进行拟合. 单方向拟合时, 公式(1)可理解为两个方向上相关系数的乘积, 因此针对单方向拟合可采用

$$y = a_1 e^{-\left(\frac{x_1 - b_1}{c_1}\right)^2}. \quad (2)$$

图 4 给出了在上述条件下, 2008 年 1 月正午中国区域单方向拟合的结果, 表 2 列出了各项拟合系

表 2 拟合函数系数及评价指标

Table 2 Fitting function coefficients and evaluation index

拟合系数及精度检验指数	Meridional	Zonal
$a_1$	$1.039 \times 10^{12}$	1.054
$b_1$	-9641	-12.33
$c_1$	980.3	60.51
SSE	0.004706	0.0007567
R-square	0.9877	0.9956
Adjusted R-square	0.9856	0.9939
RMSE	0.0198	0.0123

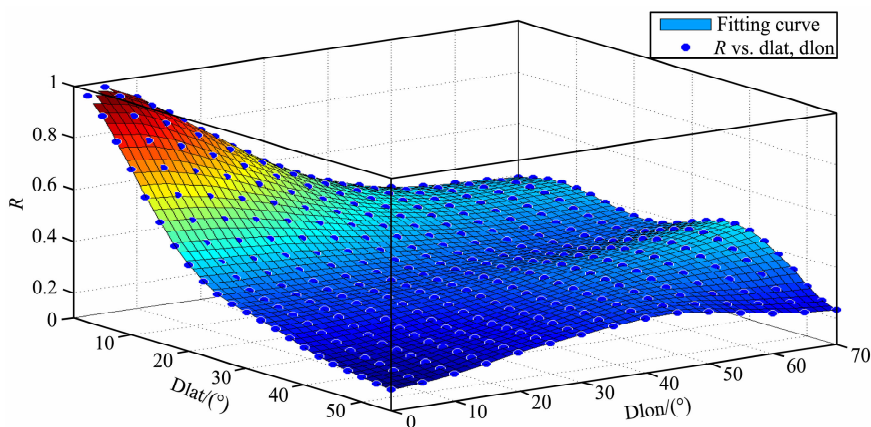


图 3 2008 年 1 月正午中国区域各站点平均相关系数与经纬度差的拟合曲面

Fig. 3 Fitting surface of average midday correlation coefficient with the latitude and longitude in China on January 2008

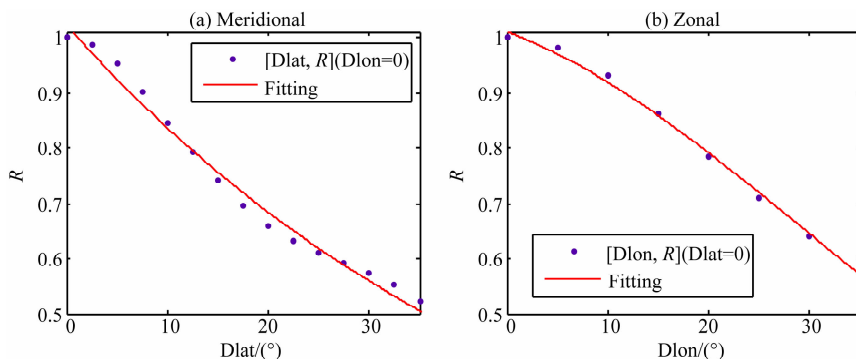


图 4 2008 年 1 月正午中国区域经向(a)和纬向(b)相关系数变化的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of midday correlation coefficient with the latitude and longitude on January 2008

数及拟合效果评价指标。图 4a 为同一条经线方向上的平均相关系数与纬度差的拟合效果,该拟合结果存在较大偏差,物理意义上并不能准确对应,但就统计学而言,能够满足分析的需要;图 4b 为同一条纬线方向上的平均相关系数与经度差的拟合结果,这里采用的拟合数据偏少,拟合曲线接近各散点,并表现出较好的拟合趋势和整体效果。

## 4 结果分析

根据上述采用的 GPS TEC 观测资料和数据处理方法,本文主要探讨了 TEC 背景场空间变化的主要特征,并以 2008 年(太阳活动低年,年平均  $F_{107}$  为 69sfu)和 2011 年(太阳活动高年,年平均  $F_{107}$  为 113sfu)为例,从相关尺度的概念上分析了背景场空间变化特征随太阳活动水平、地磁条件和季节的变化关系。

### 4.1 电离层 TEC 背景场空间变化特征分析

以 2008 年 6 月 10UT 时刻为例,通过计算相同经纬度差条件下格网点之间的平均相关系数,对研

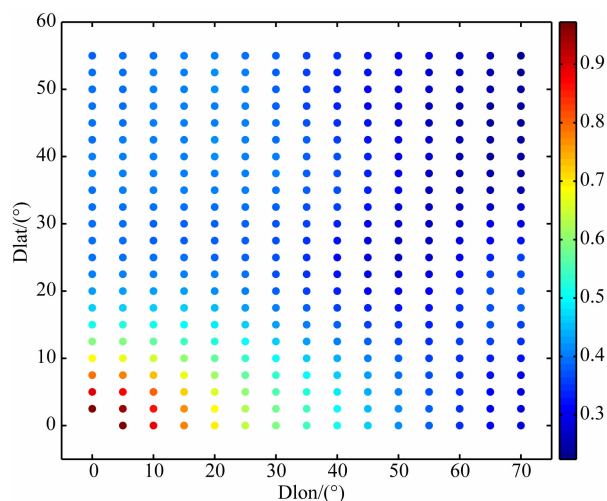


图 5 中国区域内各格网点间平均相关系数随经纬度差异的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of average correlation coefficient with latitude and longitude in China

究区域内背景场的整体空间变化特征进行分析。图 5 给出了 2008 年 6 月 10UT 时刻研究区域内电离层 TEC 背景场各格网点间平均相关系数随经纬度差异的空间分布,该图中呈现的相关系数忽略了格

网点绝对位置的差异,认为两个格网点之间空间变化的相关性仅与它们分布的相对位置有关;从图中可以看出,该空间分布的结果否定了目前同化过程中所采用的各项同性的假设(於晓等,2007;王勇等,2011;Derber and Rosati,1989),与 Bust 等(2004)的判断一致,具有椭圆形高斯分布的特征;而在一定的经纬度差范围内,格网点之间的距离越近,相关系数越大,相关性越高,两个格网点之间的空间变化相关系数随着其间的经度差和纬度差的增大而逐渐减小,且经向的变化速率大于纬向,在实际意义中表现为经向的特征相关尺度小于纬向的;经多时段验证,发现这种现象在不同时刻均有相似的表现。

然而,根据电离层形态及相关物理过程,电离层 TEC 背景场的空间变化并不是相对位置的函数,其空间变化特征与其绝对位置之间存在相当大的关系.因此,我们将研究区域按照经度和纬度分别进行划分,探讨背景场空间变化特征与经度和纬度位置之间的关系。

根据研究区域的覆盖范围,在纬度上将其划分为  $0^{\circ}$ — $30^{\circ}$ N 的低纬度地区和  $30^{\circ}$ N— $55^{\circ}$ N 的中纬度区域,在经度上基本按照时区划分为  $80^{\circ}$ E— $95^{\circ}$ E、 $95^{\circ}$ E— $110^{\circ}$ E、 $110^{\circ}$ E— $125^{\circ}$ E 和  $125^{\circ}$ E— $140^{\circ}$ E 四个区域.图 6 和图 7 分别给出了不同纬度区域和不同经度范围下格网点间平均相关系数随经纬度差异的空间分布。

图 6 中 a 和 b 两幅图分别表示了低纬地区 ( $0^{\circ}$ — $30^{\circ}$ N) 和中纬度地区 ( $30^{\circ}$ N— $55^{\circ}$ N) 各格网点间平均相关系数随经纬度差异的空间分布,从图中

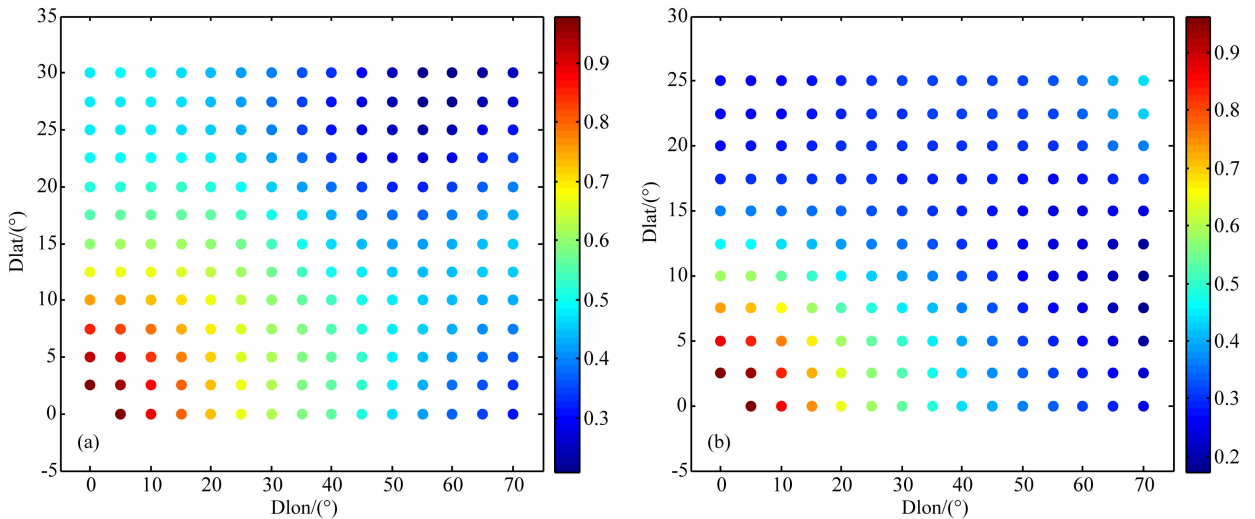


图 6 不同纬度范围内各格网点间平均相关系数随经纬度差异的空间分布((a) 低纬地区;(b) 中纬地区)  
Fig. 6 Spatial distribution of average correlation coefficient with latitude and longitude of different latitudes

(a) Low latitudes; (b) Middle latitudes.

可知,不同纬度范围的电离层 TEC 背景场空间变化具有相同的结构特征,格网点之间的相关性均随着其间经纬度差的增大而逐渐减小,且在经度和纬度方向上的变化梯度存在差异,具有椭圆形高斯分布的特点;比较两者发现,低纬度地区格网点间相关系数的变化速率低于中纬度区域,低纬度区域的分布图中较高相关系数占据的范围在经向和纬向上均大于中纬度区域.由此可知,不同纬度的研究区域,其电离层背景场的变化结构存在差异。

图 7 给出了不同经度范围内各格网点间平均相关系数随经纬度差异的空间分布,为了消除其他外在因素的影响,将数据统一为地方时进行分析,以 18LT 为例,图 7 中 a、b、c、d 分别表示了  $80^{\circ}$ E— $95^{\circ}$ E、 $95^{\circ}$ E— $110^{\circ}$ E、 $110^{\circ}$ E— $125^{\circ}$ E 和  $125^{\circ}$ E— $140^{\circ}$ E 四个区域平均相关系数的分布情况;从图中可以看出,不同经度范围的电离层 TEC 背景场空间变化特征相似,且在相同当地时条件下,特征表现差异较小,表现较为一致.因此,我们认为在中国区域内不同经度的研究区域,在相同地方时的情况下,其电离层背景场的变化结构特征差异可近似忽略。

在上述分析不同空间位置对变化特征影响的基础上,以  $120^{\circ}$ E 的时刻为时间基准,考虑 2008 年 10 月正午 12LT(04UT) 和午夜 00LT(16UT) 时刻,整个中国研究区域内平均背景场结构变化特征随时间的变化情况。

图 8 中 a、b 两幅图分别表示基于  $120^{\circ}$ E 的时间基准,10 月正午 04UT 和午夜 16UT 时刻中国区域内各格网点间平均相关系数随经纬度差异的空间分

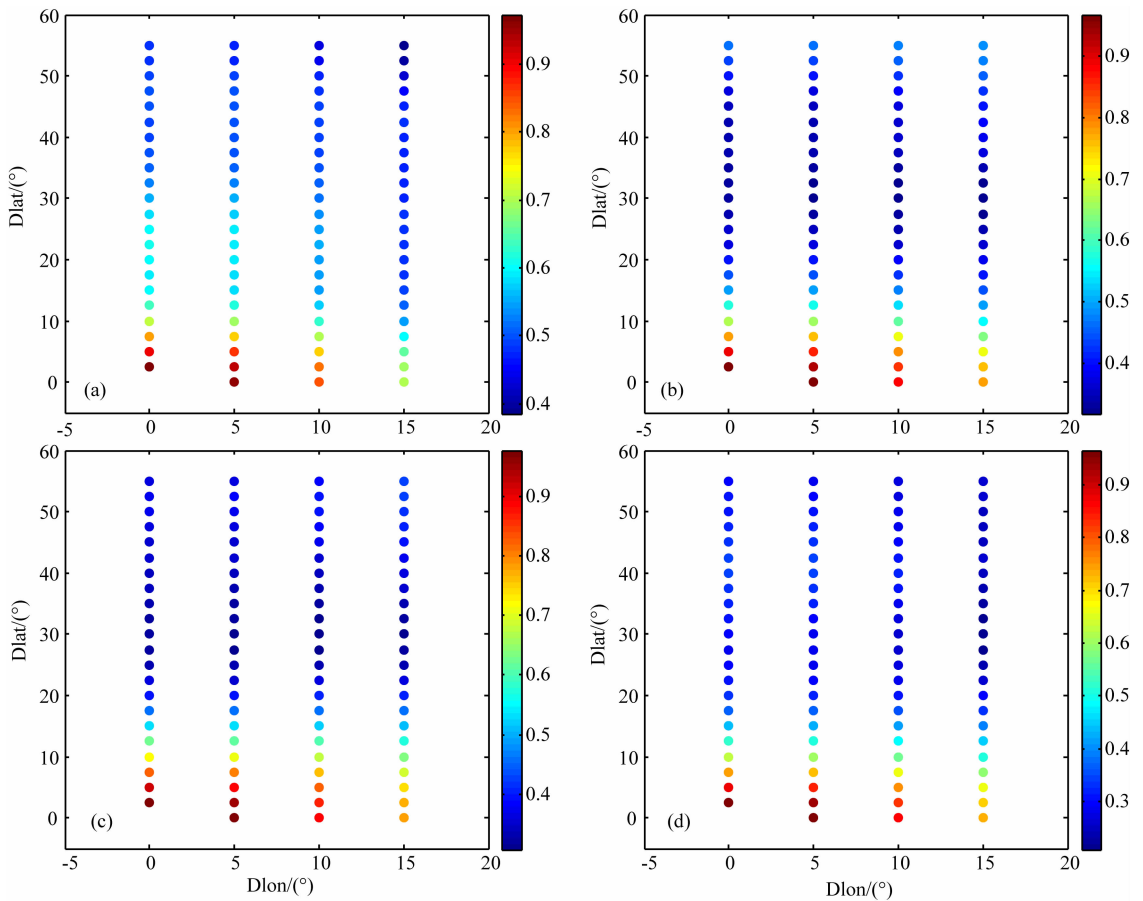


图 7 不同经度范围各格网点间平均相关系数随经纬度差异的空间分布

(a) 80°E—95°E; (b) 95°E—110°E; (c) 110°E—125°E; (d) 125°E—140°E.

Fig. 7 Spatial distribution of average correlation coefficient with latitude and longitude of different longitudes

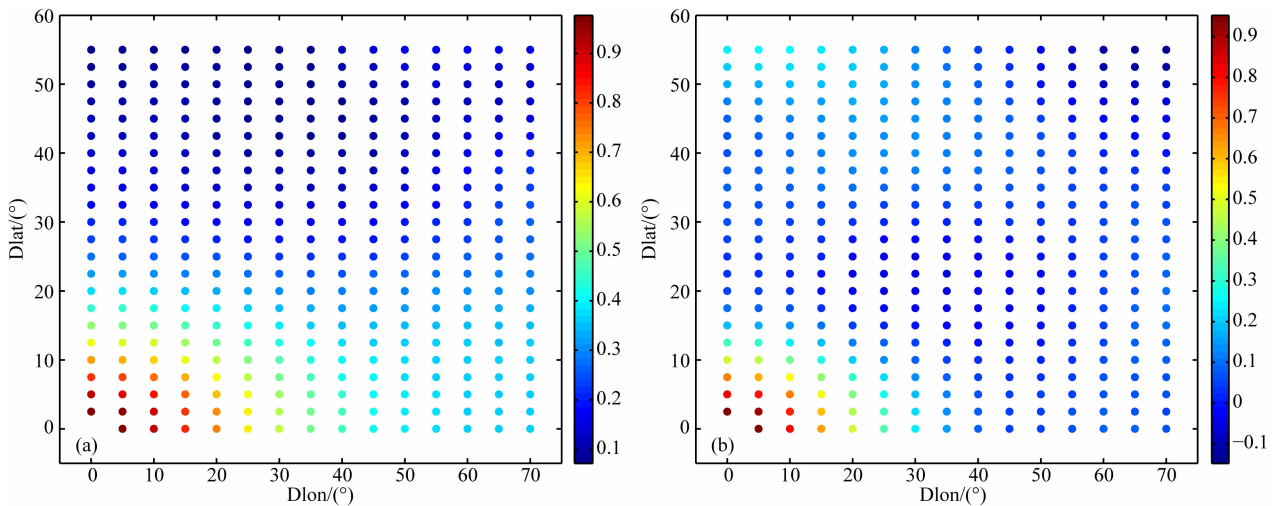


图 8 基于 120°E 的时间基准, 2008 年 10 月不同时刻中国研究区域格网点间平均相关系数随经纬度差的空间分布

(a) 04UT(12LT); (b) 16UT(24LT).

Fig. 8 Spatial distribution of average correlation coefficient with latitude and longitude

in China on October 2008 on the time base of 120° E

布,从图中可以看出,不同时刻的电离层背景场变化特征相似,均表现出格网点间距离越近,相关系数越高的趋势,且白天和夜间在经向的变化速率都大于

纬向;通过比较以上两幅图发现,白天在两个方向上的变化速率均小于夜间的,呈现出白天的相关范围大于夜间的情形,这说明不同时刻的背景场变化特

征存在差异;此外,在以上两幅图中都出现了经纬度差变大而相关系数也增大的情形,这很可能是超出截断距离后空间分布无规律的体现,对此,我们仅考虑截断距离内存在明显相关性的情况。

#### 4.2 电离层 TEC 背景场空间变化特征尺度分析

为了对电离层 TEC 背景场空间变化特征有更清晰的了解,我们从特征尺度的角度出发进行定量分析. 便于理解,定义沿着同一条经线的方向为经向,经向相关尺度表示各纬度之间的关系;沿着同一条纬线的方向为纬向,纬向相关尺度表示各经度之间的关系。

首先以 2008 年 10 月的数据为例,根据上述拟合和特征尺度计算方法获得 10 月在 12 个时刻的平均相关尺度,得到中国区域内经向和纬向的平均相关尺度随时间的变化情况,如图 9 所示. 从图中可以看出,经向和纬向的平均相关尺度随着世界时变化,两者随时间的波动趋势比较一致,白天的相关尺度大于夜间的,在当地时 6 点相关尺度出现较为明显的增大,而在 12—14UT(即 20—22LT)时段相关尺度显著减小;同时,经向的相关尺度远远小于纬向的相关尺度,这种现象在之前的各格网点间平均相关系数随经纬度差异的空间分布图中均有所体现。

根据上述相关尺度的日变化过程,以 2008 年全年为例,考察中国区域内经向和纬向的平均相关尺

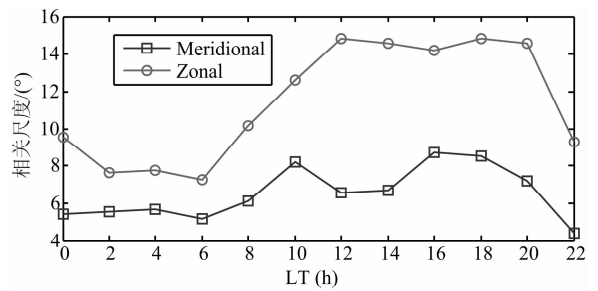


图 9 中国区域内经向和纬向平均相关尺度随当地时的变化

Fig. 9 Average correlation variations in meridional and zonal with local time in China

度在一年内的变化情况. 图 10 和图 11 分别给出了 2008 年太阳射电通量  $F_{10.7}$  的变化情况和中国区域内每月各个时刻经向和纬向的平均相关尺度的变化,由图可知,3—6 月和 9—11 月的相关尺度在经向和纬向上均较 7—8 月和 12 月更大,整体上表现为春秋季节相关尺度大于夏冬两季,然而 1—2 月却出现了相关尺度较大的情形,查看空间天气数据发现,1—2 月的  $F_{10.7}$  相对较高,致使相关尺度产生一定的增大;此外,无论白天或夜间,经向的相关尺度均小于纬向的,纬向的相关尺度波动范围远大于经向的,而两者在每月均表现出较为相似的日变化规律,在正午时刻附近相关尺度达到最大,在凌晨时分出现一次尺度增强,这种规律在纬向表现的更为显著. 从

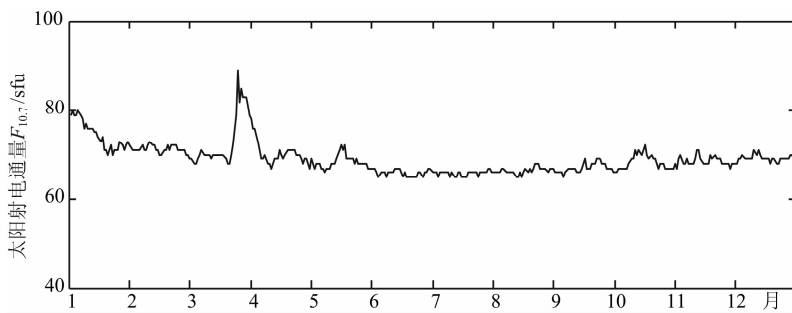


图 10 2008 年太阳射电通量  $F_{10.7}$  时间变化

Fig. 10 Solar radio flux  $F_{10.7}$  variation with time in 2008

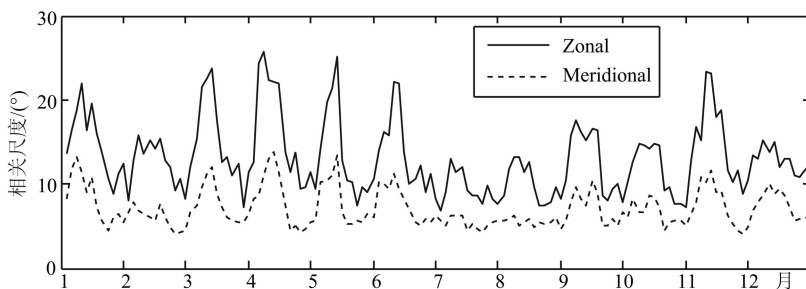


图 11 2008 年中国区域内经向和纬向平均相关尺度随时间的变化

Fig. 11 Average correlation scales variations of 2008 in meridional and zonal with time in China



整体上看,相关尺度与太阳活动之间存在相对一致的变化趋势,即太阳活动剧烈时相关尺度出现响应增加。

从图 11 的分析中,我们发现太阳活动水平对相关尺度存在不可忽视的影响,因此,选取不同太阳活动水平条件下的 2008 年 11 月和 2011 年 11 月的数据进行比较分析. 2008 年为太阳活动低年且 11 月太阳活动水平低,而 2011 年为第 24 个太阳活动周的上升期且 11 月太阳活动水平较高,因此,忽视季节的影响,分别以这两个月为例,分析太阳活动水平对相关尺度的影响. 图 12 给出了不同太阳活动水平条件下中国区域内经向和纬向平均相关尺度随时间的变化情况. 从图中可知,一般情况下,太阳活动水平越高,相关尺度越大,且纬向相关尺度对太阳活动水平变化的响应更剧烈。

通常来说,地磁活动对电离层也存在一定的调

制作用. 因此根据空间天气月报,选取地磁活动水平较低的 2008 年 4 月和地磁活动较剧烈的 2011 年 4 月的数据进行分析,由于所选月份相同,且两月的太阳活动水平和电离层活动水平均较低,能够较好地反应地磁活动对相关尺度的影响。

图 13 给出了不同地磁活动水平条件下中国区域内经向和纬向的平均相关尺度随时间的变化情况,从图中可知,在当地时夜间到凌晨时段,地磁活动水平越低,相关尺度越小,而在日间到下午时段,相关尺度与地磁活动水平之间并非绝对的一致,但无论地磁活动水平如何,相关尺度随时间变化均保持较为一致的趋势。

## 5 总结与讨论

本文利用 JPL 提供的 GPS TEC 地图数据分析

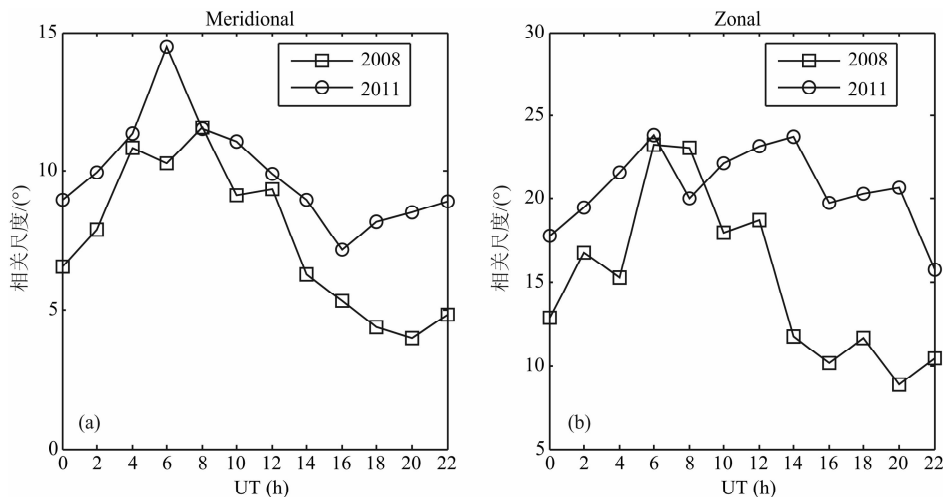


图 12 不同太阳活动水平条件下中国区域内平均相关尺度随时间的变化

Fig. 12 Average correlation scales variations of China with time in different solar active levels

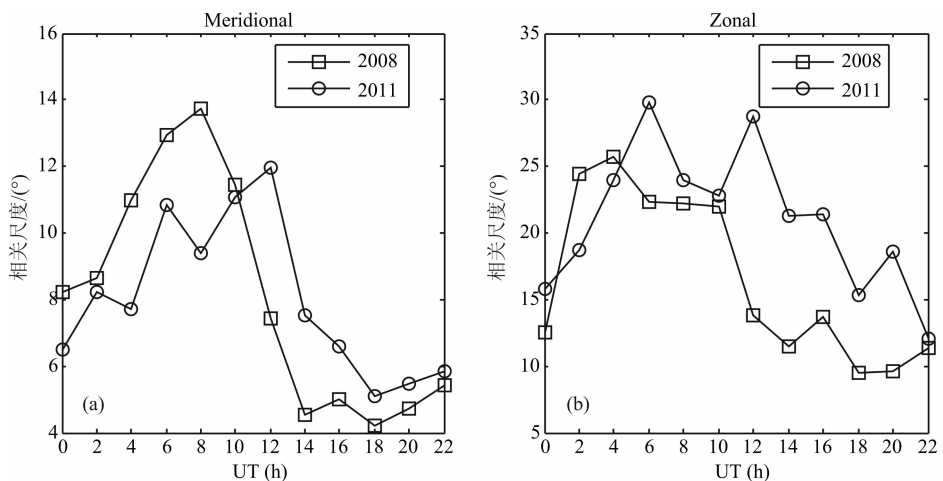


图 13 不同地磁活动水平条件下中国区域内平均相关尺度随时间的变化

Fig. 13 Average correlation scales variations of China with time in different geomagnetic active levels

了 TEC 背景场空间变化的主要特征,并以 2008 年和 2011 年为例,着重考察了空间变化特征尺度与太阳活动水平、地磁条件和季节变化之间的关系,得到了如下结果:

(1) 在一定的经纬度差范围内,格网点之间的相关系数随着其间经纬度差的增大而减小,且经向的变化速率大于纬向,即经向的相关尺度小于纬向,表现出椭圆形高斯分布的特征,而这种特征在不同时刻均有所体现,由此可以认为在进行背景场变化特征及背景误差协方差模型构建时,可以利用椭圆形高斯分布进行拟合。

(2) 研究区域的位置对电离层背景场的空间变化特征具有不可忽视的影响。不同纬度的研究区域,其电离层背景场的结构变化特征存在差异,低纬度地区格网点间相关系数的变化速率低于中纬度区域;不同经度的研究区域,在相同地方时的情况下,其电离层背景场的结构变化特征差异较小。

(3) 白天在经向和纬向上相关系数的变化速率均小于夜间的,即白天经向和纬向的相关尺度大于夜间。

(4) 从季节分析结果来看,春秋两季相关尺度大于夏冬两季;一般情况下,太阳活动水平越高,相关尺度越大,且纬向相关尺度对太阳活动水平变化的响应更剧烈;在当地时夜间到凌晨时段,地磁活动水平越低,相关尺度越小,而在日间到下午时段,相关尺度与地磁活动水平之间并不完全一致。

将本文的分析结果与之前的研究成果进行比较发现,除了在季节的尺度分析中存在一定的差异,其他分析结果基本与前人的结论相吻合。文章主要考察了 TEC 相对于月均值扰动差异的空间特征,具有逐日变化的特点,此时间尺度的变化所对应的空间结构也相对较大,JPL TEC 地图的尺度特征基本能够满足分析的需要,但是由于该 TEC 数据在计算过程中所使用的中国站点较为稀疏,精度不高,这也必然对分析结果产生着影响。

为了对上述不足进行改进,下一步,我们将增加数据量并利用更高精度的中国 GPS 连续站数据进行分析,以进一步验证本结果的可靠性,从而得到更为稳定可靠的相关尺度统计结果,为电离层背景场协方差模型的构建奠定基础。

**致谢** 感谢 JPL 提供的 GPS TEC 地图数据资料,感谢中国气象局国家卫星气象中心毛田、王云冈提供的宝贵意见。

## References

- Angling M J, Cannon P S. 2004. Assimilation of radio occultation measurements into background ionospheric models. *Radio Sci.*, 39(1), doi: 10.1029/2002RS002819.
- Bust G S, Garner T W, Gaussiran II T L. 2004. Ionospheric Data Assimilation Three-Dimensional (IDA3D): A global, multisensor, electron density specification algorithm. *Journal of Geophysical Research*, 109(A11): A11312, doi: 10.1029/2003JA010234.
- Cander L R. 2006. Spatial correlation of  $f_oF_2$  and TEC under quiet and disturbed ionospheric conditions. *Geophysical Research Abstracts*, 8, 01103.
- Derber J, Rosati A. 1989. A global oceanic data assimilation system. *J. Phys. Ocean.*, 19(9): 1337-1347.
- Gail W B, Prag A B, Coco D S, et al. 1993. A statistical characterization of local mid-latitude total electron content. *Journal of Geophysical Research*, 98(A9): 15717-15727.
- Guo P. 2006. GPS radio occultation technique and CHAMP occultation data retrieval (in Chinese) [Ph. D. thesis]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences.
- He M S. 2011. A number of studies of ionospheric structural on the base of COSMIC occultation observations (in Chinese) [Ph. D. thesis]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics: Chinese Academy of Sciences.
- Howe B M, Runciman K, Secan J A. 1998. Tomography of the ionosphere: Four-dimensional simulations. *Radio Sci.*, 33(1): 109-128.
- Liu X C, Shen J, Li Y G. 2010. A generalized auto-regressive conditional heteroskedasticity model for system marginal price forecasting based on weighted double gaussian distribution. *Power System Technology* (in Chinese), 34(1): 139-144.
- Schunk R W, Scherliess L, Sojka J J, et al. 2004. Global assimilation of ionospheric measurements (GAIM). *Radio Sci.*, 39(1): RS1S02, doi: 10.1029/2002RS002794.
- Wang Y, Lin Z X, Yu T. 2011. An OI-based assimilation method of vertical ionospheric electron density profile over Xiamen. *Chin. J. Space Sci.* (in Chinese), 31(6): 771-777.
- Wu X C. 2008. Radio occultation technique for ionosphere detection (in Chinese) [Ph. D. thesis]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences.
- Xiong N L, Tang C C, Li X J. 1999. Introduction to Ionospheric Physics (in Chinese). Wuhan: Wuhan University Press.
- Xu J S, Zou Y H, Ma S Y. Time-dependent 3-D computerized ionospheric tomography with ground-based GPS network and occultation observations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 48(4): 759-767.
- Yu T, Wang Y G, Mao T, et al. 2011. Ionospheric Data Assimilation and Inversion Experiment with Using the Single Ionosonde and GPS Data (in Chinese). Xiamen: Chinese Meteorological Society 28th Annual Meeting.

- Yu X, Wan W X, Liu L B, et al. 2007. A study of correlation distance of the day to day variability of F<sub>2</sub> layer peak electron density over Europe. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 50(5): 1283-1288.
- Yuan Y B. 2002. Study on theories and methods of correcting ionospheric delay and monitoring ionosphere based on GPS (in Chinese) [Ph. D. thesis]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics; Chinese Academy of Sciences.
- Yue X A. 2008. Modeling and data assimilation of mid-and low-latitude ionosphere (in Chinese) [Ph. D. thesis]. Beijing: Chinese Academy of Sciences.
- Zhang Q W, Guo J S, Zhang G L, et al. 1995. Mid-and low-latitude ionospheric responses to different type of magnetic storm. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 38(5): 581-589.
- Zhuang Z R. 2004. Study of the statistical structure of background errors and its impact on 3D-Var (in Chinese) [Ph. D. thesis]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- 郭鹏. 2006. 无线电掩星技术与 CHAMP 掩星资料反演[博士论文]. 上海: 中国科学院研究生院(上海天文台).
- 何茂盛. 2011. 基于 COSMIC 星群掩星观测的电离层若干结构研究[博士论文]. 北京: 中国科学院研究生院.
- 刘西陲, 沈炯, 李益国. 2010. 基于加权双高斯分布的广义自回归条件异方差边际电价预测模型. *电网技术*, 34(1): 139-144.
- 王勇, 林兆祥, 余涛. 2011. 厦门电离层垂测仪电子浓度剖面最优插值同化的初步建立. *空间科学学报*, 31(6): 771-777.
- 吴小成. 2008. 电离层无线电掩星技术研究[博士论文]. 北京: 中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心).
- 熊年禄, 唐存琛, 李行健. 1999. 电离层物理概论. 武汉: 武汉大学出版社.
- 徐继生, 邹玉华, 马淑英. 2005. GPS 地面台网和掩星观测结合的时变三维电离层层析. *地球物理学报*, 48(4): 759-767.
- 余涛, 王云冈, 毛田等. 2011. 利用单站电离层测高仪与 GPS 数据的同化反演试验. 厦门: 第 28 届中国气象学会年会.
- 於晓, 万卫星, 刘立波等. 2007. 欧洲地区电离层峰值电子密度逐日变化的相关距离研究. *地球物理学报*, 50(5): 1283-1288.
- 袁运斌. 2002. 基于 GPS 的电离层监测及延迟改正理论与方法的研究[博士论文]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所.
- 乐新安. 2008. 中低纬电离层模拟与数据同化研究[博士论文]. 北京: 中国科学院研究生院.
- 张奇伟, 郭兼善, 章公亮等. 1995. 不同类型磁暴和中低纬电离层暴的关系. *地球物理学报*, 38(5): 581-589.
- 庄照荣. 2004. 背景场误差的结构特征及其对三维变分同化影响的研究[博士论文]. 北京: 中国气象科学研究院.

(本文编辑 胡素芳)