

张辉, 马娟, 缪杰, 李广松, 范军, 刘凯, 郑拓, 2015. 基于 JPL-GIM 数据研究昆明地区 VTEC 的变化特征. 震灾防御技术, 10 (增刊): 739—749. doi: 10.11899/zzyfy2015s105

基于 JPL-GIM 数据研究昆明地区 VTEC 的变化特征

张 辉¹⁾ 马 娟¹⁾ 缪 杰²⁾ 李广松³⁾ 范 军³⁾ 刘 凯⁴⁾ 郑 拓⁵⁾

1) 山东省地震局昌邑地震台, 潍坊 261300

2) 山东省地震局陵阳地震台, 日照 276800

3) 山东省潍坊市地震局, 潍坊 261300

4) 山东省地震局德州地震台, 德州 253000

5) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘要 利用下载的 JPL-GIM (Jet Propulsion Laboratory-Global Ionosphere Map, 美国加利福尼亚喷气动力实验室全球电离层地图) 数据, 分析了昆明地区 2001—2012 年 VTEC (Vertical Total Electron Content) 随时间变化的特性。结果表明, 春、秋、冬三季的 VTEC 平均最高值均出现在“08:00UT”, 而夏季的 VTEC 平均最高值出现在“10:00UT”, 四季的 VTEC 平均最低值出现在“22:00UT”; VTEC 变化存在季节异常, 即春、秋季节高, 夏、冬季节低; 昆明地区的 VTEC 在 2001—2009 年呈现出逐渐下降的变化趋势, 自 2010 年开始逐渐增强, 年际变化与太阳活动及地磁活动变化的趋势呈现出较好的对应关系, 且 VTEC 变化与太阳活动存在较强的相关性, 其相关系数达到了 0.8 以上, 而与地磁活动则显示出了相对较弱的相关性。

关键词: 昆明地区 VTEC 季节变化

引言

电离层电子总含量 TEC (Total Electron Content) 不但是研究电离层形态学的重要资料, 而且也是导航、精密定位和电波科学中有关电离层修正的重要参数。其垂直分量 VTEC (Vertical Total Electron Content) 的变化与很多因素有关, 如地方时、季节、太阳活动、地磁活动以及突发空间事件 (如磁暴) 等。在赤道及低纬度地区, 由于电离层异常现象的存在, VTEC 表现得非常复杂, 所以研究 VTEC 的形态及其变化特征, 对于空间天气学的研究和总电子含量模式的完善有着非常重要的意义和指导作用。在电离层研究中, 低纬电离层占有非常重要的地位, 同样也是研究电离层空间天气不可缺少的部分, 因而研究低纬电离层对于通讯和航天活动具有重要作用 (Torr 等, 1973)。

低纬地区的 VTEC 变化频繁, 这是由于电离层异常区赤道电场变化、地球南北向中性风

[收稿日期] 2015-01-04

[作者简介] 张辉, 男, 生于 1984 年。工程师。主要从事数字地震学研究。E-mail: 1064883633@qq.com

[通讯作者] 郑拓, 男, 生于 1992 年。研究生。主要从事地震动力学, 地球探测与信息技术研究。E-mail: z6824465@sina.com

场的转变以及大气中性成分的增减等因素的影响 (Kumar 等, 2009)。VTEC 由于受到太阳活动和地磁活动影响, 其峰值位置会发生相应的移动, 除此之外, VTEC 赤道异常的峰区位置也会随着时间的变化发生南北移动 (Huang 等, 1989)。比如, 强烈的太阳活动会使得 VTEC 赤道异常区的峰值位置向北移动至北回归线附近, 因而 VTEC 值会显示出高值; 相反, 在弱太阳活动期间, VTEC 赤道异常区的峰值位置会靠近磁赤道, 相应北回归线的位置则会处于 VTEC 赤道异常区的峰值以外的边缘区, 因而 VTEC 值可能会显示出低值。VTEC 赤道异常区的北峰峰区覆盖了近半个中国的版图, 因此着重研究 VTEC 赤道异常峰区电离层的特点, 就可以在一定程度上掌握中国电离层的某些重要特性。由于昆明地区处于 VTEC 赤道异常区的北峰峰区中, 所以 VTEC 峰值位置的变化可以通过以昆明为代表的北回归线附近地区的 VTEC 日变化波动表现出来。这对于研究 VTEC 赤道异常北峰区的变化特征和低纬地区电离层对太阳活动与地磁活动响应的物理过程具有重要的科学意义 (Rishbet, 1998)。

在国际上, 对于 VTEC 的研究主要是在国际全球导航卫星系统服务中心 (IGS) 的支持下, 由美国加利福尼亚喷气动力实验室 (JPL) 等机构进行 (毛田等, 2005)。本文就是基于 JPL-GIM (Jet Propulsion Laboratory-Global Ionosphere Map, 美国加利福尼亚喷气动力实验室全球电离层地图) 的数据, 对昆明地区 2001—2012 年的 VTEC 进行时间变化规律的分析。为了研究 VTEC 与太阳活动和地磁活动的相互关系, 本文选取了 $F_{10.7}$ 和 Dst 指数分别与 VTEC 进行相关性分析。研究结果在一定程度上可以反映昆明地区 VTEC 伴随太阳活动周期的变化规律, 并且可以代表低纬地区电离层中 VTEC 的部分性质, 对于进一步理解 VTEC 的变化特征以及改善电离层模型的模拟、预测精度, 都具有重要的参考和应用价值。

1 数据获取和处理方法

JPL 的 Mannucci 和 Wilson 采用 8 阶球谐函数的方法, 率先绘制出了全球电离层地图 (GIM)。JPL 不仅最先研制出了 GIM, 而且还率先研制了全球电离层同化模型 GAIM (Global Assimilative Ionospheric Model)。GAIM 采用实时的测量数据, 如: GPS 测量数据、非相干散射雷达、电离层测高仪和 GPS 掩星等数据作为输入, 并实时调整模式参数, 从而使得 JPL-GIM 在电离层地图方面的研究地位一直世界领先 (Ma 等, 2003)。JPL-GIM 采用全球 100 多个 GPS 台站的观测数据, 基于卡尔曼滤波的电离层数据同化系统的初步构建和实验结果 (乐新安等, 2011), 在对斜向 TEC 进行投影时, 采用卡尔曼滤波算法和四维变分方法 (熊波等, 2010) 可以把部分 VTEC 同化到背景模式中, 实现对模型的优化。得到时间范围为世界时 0—22 时, 时间间隔为 2 小时, 经度范围为 -180° — 180° , 经度间隔 5° , 纬度范围 87.5° — -87.5° , 纬度间隔 2.5° 的全球电离层地图。

本文使用的数据均为从 JPL 网站上获取的。数据的格式为世界时 0—22 时, 时间间隔为 2 小时, 即 1 天 12 个数据。数据处理方法是选取昆明台站 (25.25°N , 102.64°E) 周围的 4 个数据点, 得到一个四边形网格, 对网格的四个端点计算平均值, 其结果即为昆明地区的 VTEC 值。这虽然不是通常的计算方法, 但笔者进行这样处理的理由是: VTEC 是一个空间大尺度特征量, 因而没有某一个点处的值。例如: 本文所下载的数据是经度每 5° 有值, 纬度每 2.5° 有值, 而昆明的经度是 102°E , 在这个经度没有值, 因此可以用它东西方向临近的 100°E

和 105°E 格点上面的 VTEC 值；而昆明的纬度是 25°N，在这个纬度没有值，因此取南北方向临近的 22.5°N 和 25°N 格点上面的 VTEC 值，这样采用东西南北 4 个格点的 VTEC 值做一个平均，就可以视为昆明地区的 VTEC 值，具体方法如图 1 所示。图中黑点即为昆明地区，A、B、C、D 四点的 VTEC 值取平均，就可以视为昆明地区的 VTEC 值。

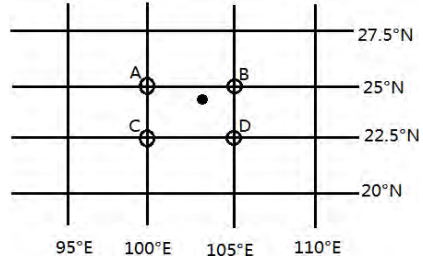


图 1 昆明地区 VTEC 数据处理方法

Fig. 1 Data processing method of VTEC in Kunming area

2 统计结果对比分析

2.1 VTEC 的变化规律

为了获得昆明地区 VTEC 的一般变化规律，笔者选取世界时 (UT) 和整点时刻的 VTEC 数据，并将每年 12 个月的数据划分为春 (3—5 月)、夏 (6—8 月)、秋 (9—11 月)、冬 (12、1、2 月) 四个部分。这里需要说明的是，由于本文没有获取 2013 年的 VTEC 数据，所以 2012 年冬季的 VTEC 数据仅有 2012 年 12 月这 1 个月的数据作为的代表。图 2 和图 3 分别给出了 2001—2006 年和 2007—2012 年春、夏、秋、冬各季节 VTEC 的变化形态，图中纵坐标 TECU 表示 VTEC 的单位。

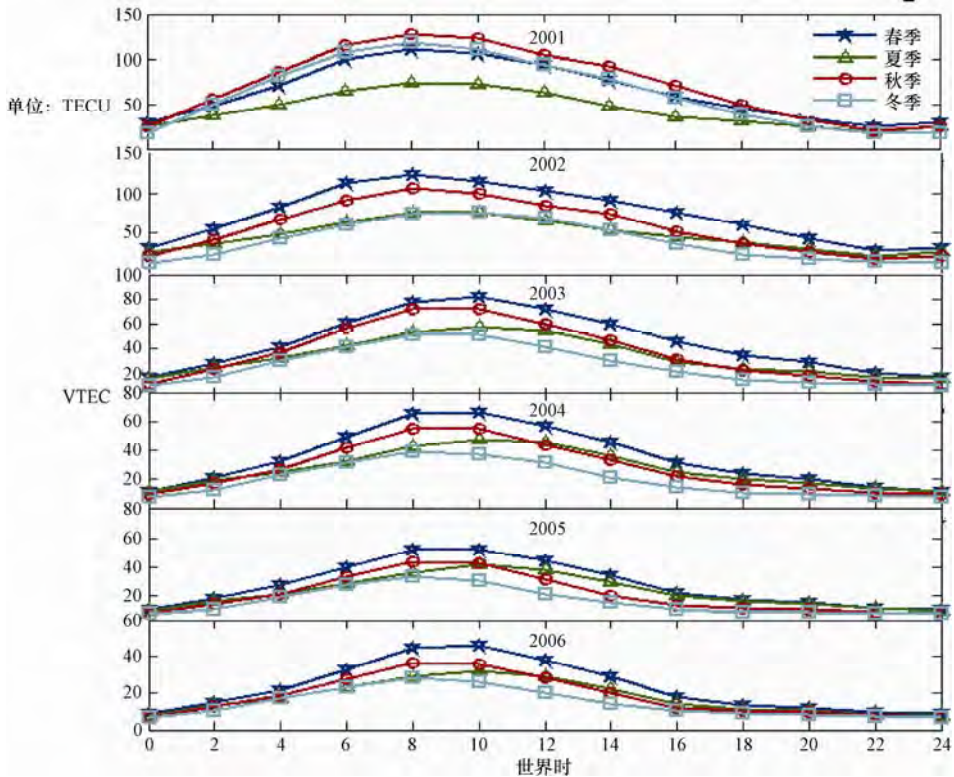


图 2 2001—2006 年 VTEC 的季节变化 (当地时=世界时+6.8 小时)

Fig. 2 Seasonal variation of VTEC during 2001—2006 (LT=UT+6.8 (h))

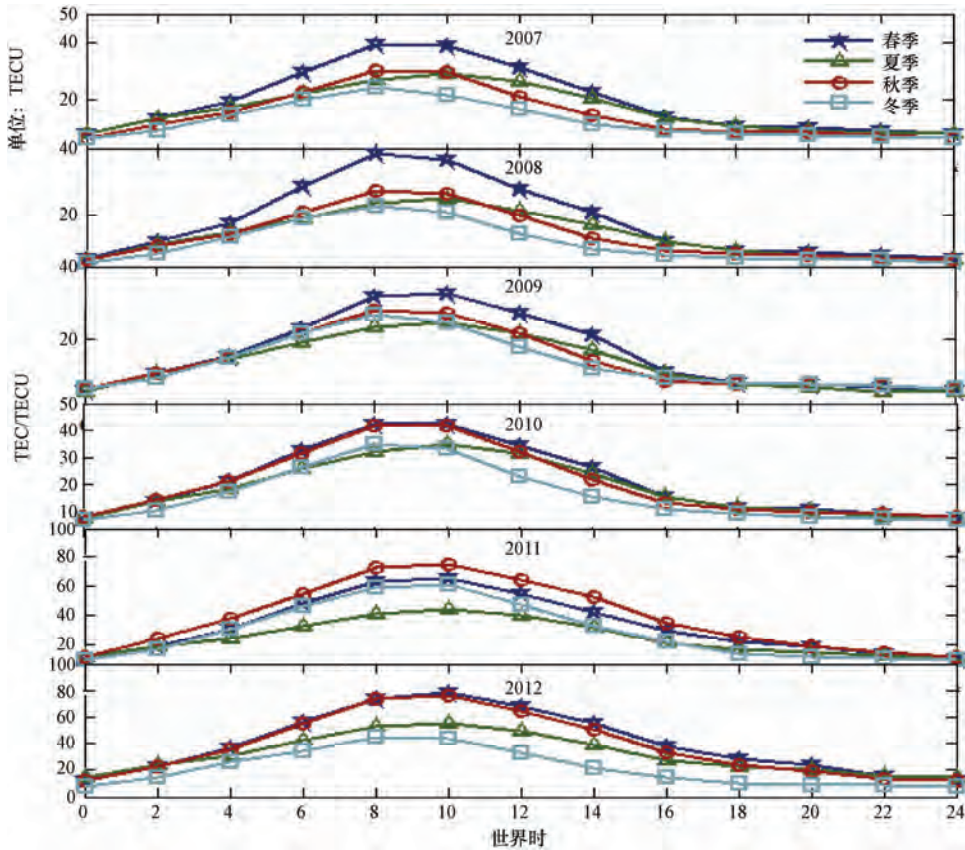


图3 2007—2012年VTEC的季节变化(当地时=世界时+6.8小时)

Fig. 3 Seasonal variation of VTEC during 2007—2012 (LT=UT+6.8 (h))

(1) VTEC 日变化。将 VTEC 数据分为春、夏、秋、冬 4 个季节，并分析每个季节 VTEC 的日变化趋势。例如：将 2012 年春季（3—5 月）每日的第一个数据加起来除以 92，作为 2012 年春季平均日变化的第一个值；将 2011 年秋季（9—11 月）每日第二个数据加起来除以 91，作为 2011 年秋季平均日变化的第二个值。从图 2 和图 3 中可以看出，每个季节 VTEC 的平均日变化趋势几乎相同，在时间分布上呈现明显的高值和低值时间段，即“02:00UT—16:00UT”为相对高值时间段；“16:00UT—02:00UT”为相对低值时间段。VTEC 从“00:00UT”开始逐渐上升，在“08:00UT”达到 1 天中的最大值（夏季为 10:00UT），之后逐渐减小，到“16:00UT”开始进入低值水平，并且在“22:00UT”达到最小值；而随着太阳的升起，VTEC 又开始逐渐增大，进入下一天的高值分布，如此循环。类似的日变化在 12 年的数据中也均有所体现，因此可以认为，这种变化特征是昆明地区 VTEC 日变化的基本特征。这与 Azpilicueta 等（2008）和 Galav 等（2010）的研究结果类似，只是由于测站所处经纬度的差异，最大值出现的时刻有所不同。

(2) VTEC 季节变化。从图 2 和图 3 中还可以看出 VTEC 季节异常变化的特征。比如以 2006 年为例：春季 VTEC 表现为明显的高值分布，且高于其他季节，日最大值出现在“08:00UT—10:00UT”；而冬季是 VTEC 最低值的季节，平均最大值低于 25TECU，

且出现在“08:00UT”；秋、冬两季 VTEC 的变化趋势较为接近，总体上秋季的 VTEC 平均最大值比冬季大；夏季 VTEC 的平均最大值出现在“10:00UT”。同时 2002—2010 年以及 2012 年的 VTEC 变化与 2006 年类似，而 2001 年和 2011 年的 VTEC 变化稍有不同，但是 VTEC 季节变化的差异仍然较为明显。另外还可以看出，VTEC 的峰值和谷值绝大部分出现在春、秋季和夏、冬季，并且不同季节的峰值时间是不一样的。为了使昆明地区 VTEC 的变化特征更加突显，笔者还给出了昆明地区当地时 (LT) 与世界时 (UT) 之间的关系： $LT=UT+6.8$ (h)。

(3) VTEC 年际变化。笔者将 2001—2012 年 VTEC 峰值 (VTEC Peak) 进行了月均值处理，即 1 个月中每日的 VTEC 最大值相加再除以该月的天数，进而可计算出不同季节 VTEC Peak 的平均值。表 1 给出了 2001—2012 年各个季节 VTEC Peak 的平均值变化情况。从表 1 可以看出，昆明地区 VTEC Peak 的平均值在太阳活动低年期间 (2005—2010 年) 处于低值的分布状态，其平均最大值低于 60 TECU；在 2001—2010 年 VTEC Peak 的平均值表现为逐年下降的年际变化趋势；相较于前 9 年，VTEC Peak 的平均值从 2010 年开始逐年上升。上述 VTEC Peak 的变化特征，反映出了 VTEC Peak 的量值受到了太阳活动的重要影响。例如：在太阳活动高年，VTEC Peak 的平均值表现为高值，但在低年则恰恰相反。

表 1 2001—2012 年各个季节 VTEC Peak 的平均值 (单位: TECU)

Table 1 Seasonal average value of VTEC Peak during 2001—2012 (unit: TECU)

	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年
春	113.02	123.43	83.26	67.81	55.29	47.18	41.32	39.87	33.98	43.80	67.96	79.61
夏	76.76	77.99	59.48	48.88	41.97	32.71	30.19	25.62	25.74	35.74	45.48	56.33
秋	130.96	108.14	76.72	57.89	46.34	38.83	32.49	28.57	29.60	44.17	78.57	78.45
冬	119.78	79.13	54.44	40.21	33.76	28.87	24.81	23.56	27.87	36.53	63.11	47.99

(4) VTEC 年变化对比分析。为分析 VTEC 年变化和半年变化特征 (余涛等, 2006), 笔者选取每日 VTEC 的 12 个数据的平均值作为当日的 VTEC 数据值, 如图 4 所示, 图中纵坐标 TECU 代表 VTEC 的单位。从图中 VTEC 变化的趋势可以看出“双峰”的特点, 即在 1 年中的春、秋季出现“峰值”, 而夏、冬季出现“低值”的现象; 并表现出很强的半年变化特征 (Shweta 等, 2010), 即 VTEC 在 1 年中由低值逐渐上涨, 当达到最大值后又逐渐降低至最低值, 仿佛出现 2 次循环。这或许是由于 1 年之中太阳直射点在南北回归线之间运动, 在春、秋季时太阳的辐射会产生光化电离作用, 这时太阳直射点在赤道附近, 同时光化电离作用也达到最强, 白天赤道上空“E 层”极化电场产生的赤道电急流也比较强烈, “E×B 漂移”引起的“喷泉效应”会变得最强; 但是在夏至和冬至时, 太阳直射点移动到南北回归线附近, 所以“喷泉效应”相对减弱。另外在春分和秋分时, 光化电离层的离子会沿着磁力线向两极的方向扩散, 引起 VTEC 赤道异常区峰值的电子浓度变大 (赵必强, 2006)。

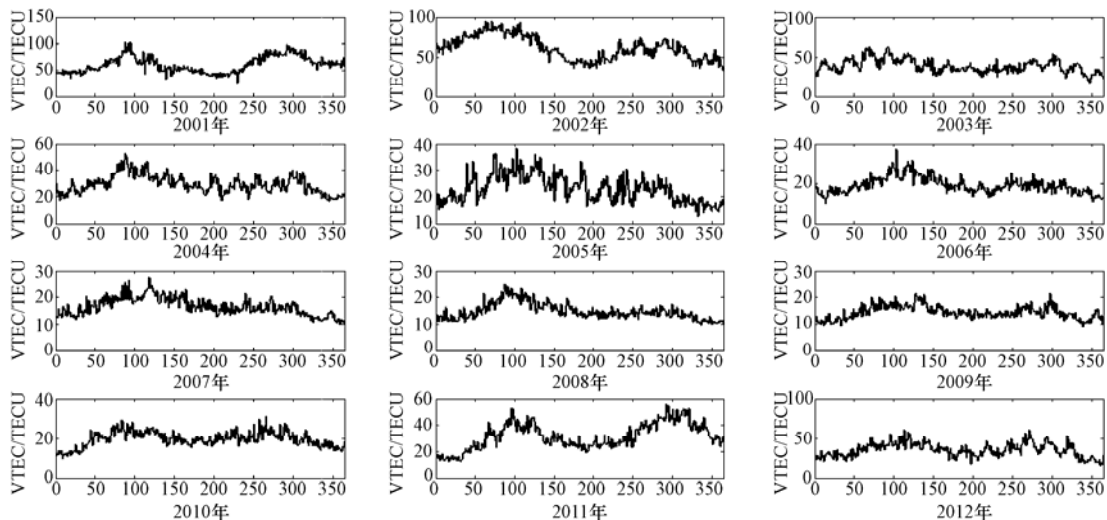


图4 VTEC年变化对比曲线(2001—2012年)

Fig. 4 Plots of Annual Variation of VTEC values (2001—2012)

2.2 太阳活动和地磁活动对 VTEC 的影响

电离层中的电离源主要来自于太阳的(极)紫外辐射和高能粒子辐射,电离层的长期变化主要受太阳活动 11 年左右的周期变化影响。伴随太阳活动所引起的闪焰、爆发日珥或日冕物质喷发等爆发事件也比较频繁,其对航空、发电、通讯等都有明显影响(Mao Tian 等, 2009)。

为进一步研究昆明地区 VTEC 的变化,笔者对 VTEC 峰值(VTEC Peak)进行了月平均计算。同时,还对昆明地区 2001—2012 年 VTEC 与太阳活动和地磁活动之间的相关性进行了研究,笔者选取了太阳活动指数 $F_{10.7}$ 和地磁活动指数 Dst 两个参量作为研究对象。其中:太阳活动指数 $F_{10.7}$ 是太阳 10.7cm 射电辐射的通量,单位为 $10^{-22}W/m^2 \cdot Hz$,常用来描述太阳活动的强度;而 Dst 指数是反映赤道环电流强度的地磁指数,常用来监测全球磁暴活动水平,它以 1 个格林威治小时为时间间隔,在经度分布较均匀的地磁台上记录地磁水平分量小时均值,并取这个水平分量小时均值与磁静日对应的小时均值之差,以 nT 为单位作为 Dst 的取值,负指数表示磁暴,负值越大磁暴的强度也就越强。

笔者对昆明地区 2001—2012 年的 Dst 和 $F_{10.7}$ 日均值求月均值,其方法为取 1 个月中每日的平均值相加再除以该月的天数;而对 VTEC Peak 求月均值的方法为,取 1 个月中每日 VTEC 的最大值相加再除以该月的天数。图 5 给出了 Dst 月均值、 $F_{10.7}$ 月均值和 VTEC Peak 月均值,其中,Dst 月均值的单位是 nT, VTEC Peak 月均值的单位是 TECU。

从图 5 可以得出昆明地区 2001—2012 年期间 Dst、 $F_{10.7}$ 、VTEC Peak 的变化特征。其中:Dst 月均值从 2003 年开始呈现出逐渐减弱的趋势,在 2009 年达到最弱水平;而表征太阳活动强弱的 $F_{10.7}$ 月均值在 2001 年和 2002 年相对较强,之后逐年下降,如在 2007 年、2008 年、2009 年都显示出了非常低的活动状态。在 2010 年,Dst、 $F_{10.7}$ 这两个指数都开始增大,表明太阳活动出现明显的上升趋势。而图 5 中 VTEC Peak 月均值的变化也很好地响应了整个年际变化的规律。另外,在 2001—2012 年的 VTEC Peak 月均值的变化中,一个相同的规律是昆

明地区 VTEC Peak 月均值的年变化以半年周期为主。VTEC Peak 月均值的逐年变化表现为, 从太阳活动峰年向太阳活动低年 (2001—2009 年) 过渡, VTEC Peak 月均值逐年下降, 而在 2010 年又开始逐渐增大。从图 5 可以清楚地看出, 2001—2012 年 VTEC Peak 月均值的变化趋势与 $F_{10.7}$ 月均值的变化趋势相近。而从 2001—2012 年 Dst 月均值变化趋势来看, 同样是在 2001—2009 年逐年减弱, 从 2010 年开始显示出逐年增强的趋势, 尽管这种趋势没有 $F_{10.7}$ 月均值那么明显。

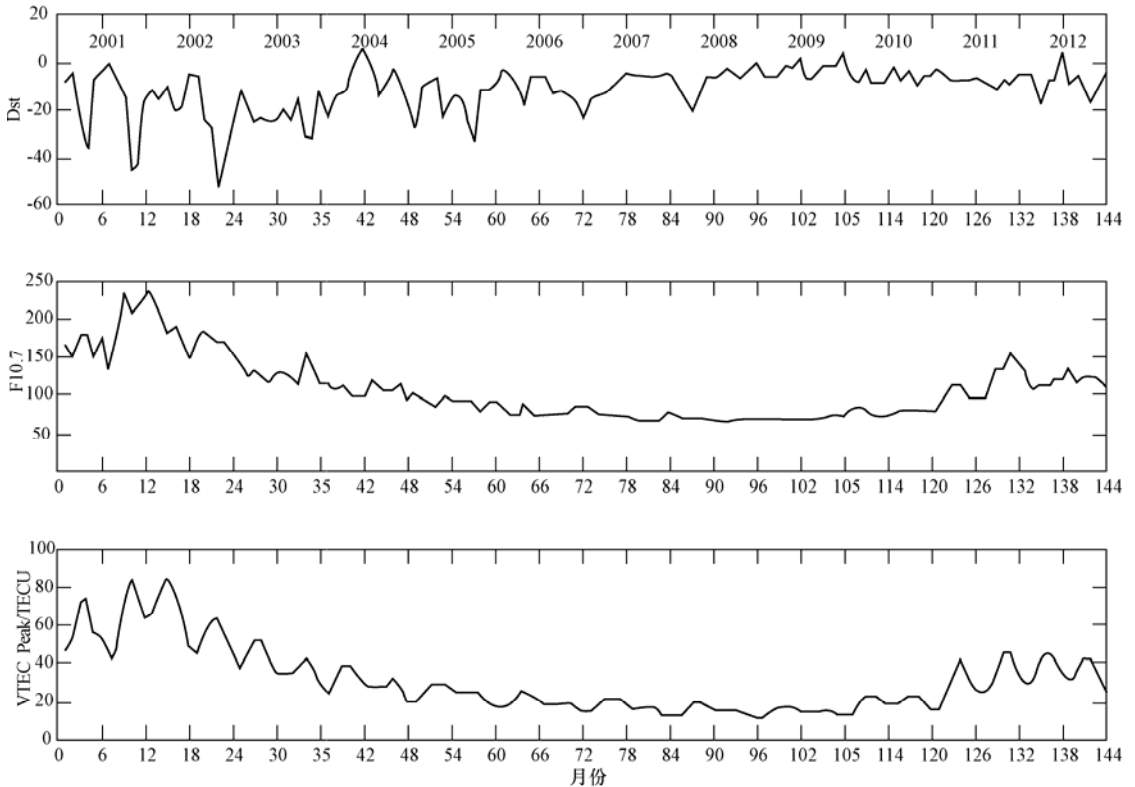


图 5 Dst、 $F_{10.7}$ 、VTEC Peak 的月均值变化曲线

Fig. 5 Monthly averaged variations of Dst, $F_{10.7}$ and VTEC Peak

图 6 分别给出了 Dst 月均值、 $F_{10.7}$ 月均值与 VTEC Peak 月均值相关性的比较。其中: 图 6 (a) 中点的含义是, 2001—2012 年每个月所对应的 VTEC Peak 月均值和 Dst 月均值, 共计 144 个点; 图 6 (b) 中点的含义是, 2001—2012 年每个月所对应的 VTEC Peak 月均值和 $F_{10.7}$ 月均值, 共计也是 144 个点; 图中的直线为线性拟合, 图中的点落在直线附近越密集, 表明图中两个参数之间的相关性越好。总体而言, 在 2001—2012 年间, $F_{10.7}$ 月均值与 VTEC Peak 月均值的变化显示出了较好的相关性, 其相关系数达到了 0.93; 而 Dst 月均值与 VTEC Peak 月均值的变化显示出了相对较弱的负相关性, 其相关系数为 -0.52。

鉴于 $F_{10.7}$ 月均值与 VTEC Peak 月均值的变化有较好的相关性, 为了进一步分析昆明地区 VTEC Peak 月均值与 $F_{10.7}$ 月均值的关系, 笔者对昆明地区 VTEC Peak 与 $F_{10.7}$ 在不同季节的月均值进行了相关性比较。

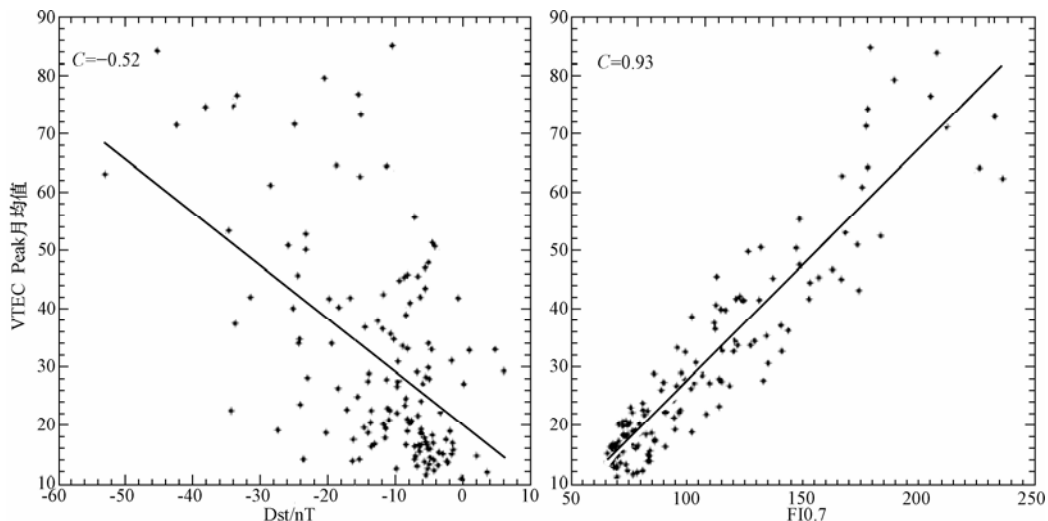


图 6 VTEC Peak 月均值与 Dst、 $F_{10.7}$ 月均值之间的相关性比较 (C 表示 2 个变量的线性系数)

Fig. 6 Correlation coefficients comparison among monthly averaged VTEC Peak with monthly averaged Dst and $F_{10.7}$ (C represents the linear correlation coefficient between two parameters)

图 7 给出了不同季节 VTEC Peak 月均值与 $F_{10.7}$ 月均值相关性的比较。 $F_{10.7}$ 作为太阳活动的重要指数, 可以从一定程度上反映出太阳活动的强弱。从图 7 可以看出, 不同季节间的相关系数略有不同, 冬季相关系数数值最大为 0.9 以上; 夏季相关系数数值最小为 0.845; 但四季的相关系数值均超过了 0.8。这反映出 VTEC Peak 月均值与 $F_{10.7}$ 月均值在四季中均具有很强的相关性。

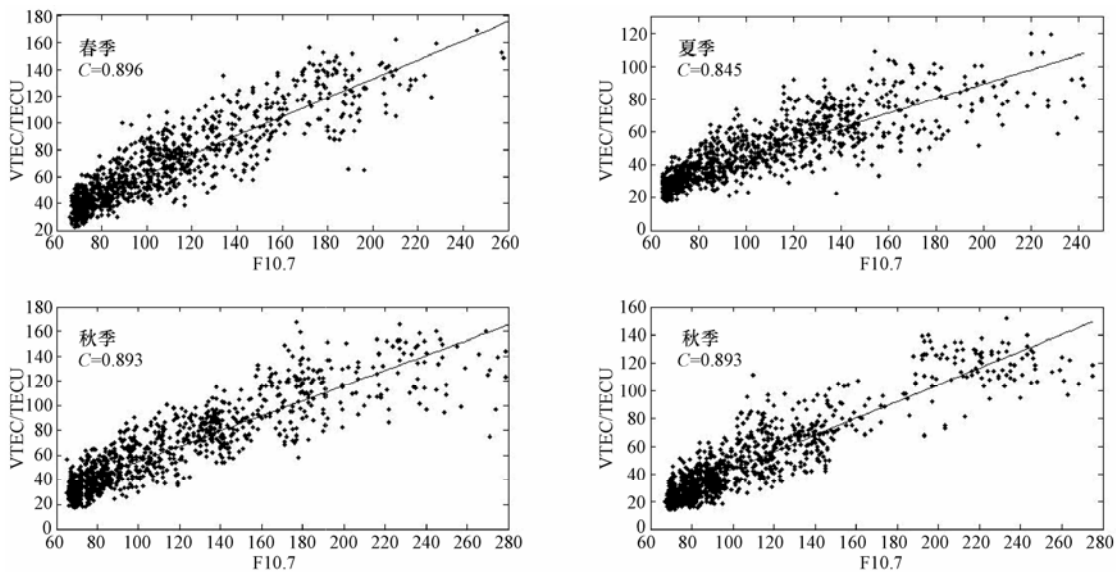


图 7 不同季节 VTEC Peak 月均值与 $F_{10.7}$ 月均值相关系数值的比较 (C 表示 2 个变量的线性系数)

Fig. 7 Comparison correlation of coefficients in different seasons between monthly averaged VTEC Peak and monthly averaged $F_{10.7}$ (C represents the linear correlation coefficient between two parameters)

有关 VTEC Peak 月均值与 $F_{10.7}$ 月均值的相关系数值,在其他一些研究中会得到不同的结果。例如: Chauhan 等 (2011)、Prasad 等 (2012)、刘国其等 (2013) 在分析太阳活动低年的观测数据时,分别得到的相关系数是近似的,相关系数值均在 0.5 左右;而 Dabas 等 (1993) 认为,在太阳活动的高年电离层电子含量与太阳活动指数将有更好的相关性,最大线性系数可以达到 0.9,这与本文的分析结果类似。这说明,VTEC Peak 月均值与 $F_{10.7}$ 月均值相关性的差异可能与太阳活跃水平有关,因为除了“喷泉”效应的直接影响外,电离层自由电子密度还会受到太阳作用的光电离和大气成分再复合过程的控制。

太阳(极)紫外线辐射通过光化电离作用将会产生更多的自由电子,因此越强的太阳活动,电离层中就会形成越高的自由电子背景密度,电子密度的垂直值 VTEC 就会越大,相关系数值的统计结果也就会相应的增大。

3 结论

由于昆明地区处在 VTEC 赤道异常区峰值的北驼峰纬度相对较高的位置上,其上空的 VTEC 变化比较复杂,通过对较长时间尺度的 VTEC 数据进行统计分析,可以获取该地区电离层变化的一些典型特征。笔者通过研究昆明地区 2001—2012 年 VTEC 的变化规律以及 VTEC 与太阳活动和地磁活动指数的相关性分析,得到了昆明地区春、秋、冬三季的 VTEC 平均最高值均出现在“08:00UT”;而夏季的 VTEC 平均最高值则出现在“10:00UT”,夏季的“22:00UT”是 1 天中 VTEC 平均最小值出现的时刻。VTEC 月均值存在季节异常的特征,其年际变化和太阳活动和地磁活动指数的变化特征相符,2001—2009 年呈现出明显下降的趋势,2010 年则显示出上升的趋势。相关性分析表明,VTEC 月均值与 $F_{10.7}$ 月均值显示出较好的相关性,相关系数值超过了 0.9;而 VTEC 月均值与 Dst 月均值则表现出相对较弱的负相关性,相关系数值为-0.52。

应该指出,低纬地区以正相暴扰动为主,分析表明约有 70% 的电离层 VTEC 暴扰动伴随着有地磁扰动(陈艳红等,2010)。但是电离层 VTEC 暴扰动并不完全由地磁扰动所引起,强烈气象活动等局地环境因素也可能对电离层 VTEC 暴扰动有着重要影响。低纬地区电离层暴扰动以正相暴为主,这与电离层 foF2 暴扰动特性分析结果相吻合(邓忠新等,2012)。空间天气事件,如磁暴、电离层暴对 VTEC 的变化具有复杂而显著的影响。在本文所选取的 VTEC 数据时段中,处于太阳活动低年时,强磁暴相对较少,不能很好地分析 VTEC 对磁暴的响应和变化等问题。但随着太阳活动逐渐进入高年时期,各种强度的空间天气事件将增多,通过电离层低纬观测链不间断的监测以及数据分析研究,将会更深入地理解低纬地区 VTEC 在不同太阳活动条件下的长期变化规律和特性。

参考文献

- 陈艳红,龚建村,马冠一等,2010. 利用卫星和 GPS 观测研究低纬局部等离子体浓度增强现象. 地球物理学报, **53** (12): 2787—2795.
- 邓忠新,刘瑞源,甄卫民等,2012. 中国地区电离层 TEC 暴扰动研究. 地球物理学报, **55** (7): 2177—2184.
- 刘国其,龚建村,黄文耿,沈华,2013. 太阳活动低年低纬地区 VTEC 变化特性分析. 空间科学学报, **33** (3): 270—276.
- 乐新安,万卫星,刘立波,宁百齐,赵必强,李国主,熊波,2011. 基于 Gauss-Markov 卡尔曼滤波的电离

- 层数值同化预报系统的构建——以中国及周边地区为例的观测系统模拟试验. 见: 中国科学院地质与地球物理研究所第十届(2010年度)学术年会论文集(下).
- 毛田, 万卫星, 刘立波, 2005. 用经验正交函数构造武汉地区电子浓度总含量的经验模式. 地球物理学报, **48**(4): 751—758.
- 熊波, 顾洁, 毛田, 单东明, 孙中伟, 2010. 地基 GPS-TEC 反演与中国地区 TEC 监测系统. 见: 第 29 届中国控制会议, 5048—5059.
- 余涛, 万卫星, 刘立波等, 2006. 利用 IGS 数据分析全球 TEC 的周年和半年变化特性. 地球物理学报, **49**(4): 943—949.
- 赵必强, 2006. 中低纬电离层年度异常与暴时特性研究. 武汉: 中国科学院武汉物理与数学研究所.
- Azpilicueta F., Brunini C., 2008. Vertical TEC in the equatorial anomaly region from satellite altimetry data. *Adv. Space Res.*, **42**: 745—752.
- Chauhan V., Singh O.P., Singh B., 2011. Diurnal and seasonal variations of GPS-TEC during a low solar activity period as observed at a low latitude station Agra. *Ind. J. Rad. Space Phys.*, **40**: 26—36.
- Dabas R.S., Lakshmi D.R., Reddy B.M., 1993. Solar activity dependence of ionospheric electron content and slab thickness using different solar indices. *Pure Appl. Geophys.*, **140**: 721—728.
- Galav Praveen, Dashora N., Sharma S., Pandey R., 2010. Characterization of low latitude GPS-TEC during very low solar activity phase. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, **72**: 1309—1317.
- Huang Y.N., Cheng K., Chen S.W., 1989. On the equatorial anomaly of the ionospheric total electron content near the northern anomaly crest region. *J. Geophys. Res.*, **94**: 13515.
- Kumar S., Singh A.K., 2009. Variation of ionospheric total electron content in Indian low latitude region of the equatorial anomaly during May 2007—April 2008. *Adv. Space Res.*, **43**: 1555—1562.
- Ma G.Y., Maruyama T., 2003. Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan. *Ann. Geophys.*, **21**: 2083—2093.
- Mao Tian, Wan Weixing, Yue X.A. et al., 2008. An empirical orthogonal function model of total electron content over China. *Radio Sci.*, **43**: RS2009, doi: 10.1029/2007RS003629.
- Prasad S.N.V.S., Rama Rao P.V.S., Prasad D.S.V.V.D., Venkatesh K., Niranjana K., 2012. On the variabilities of Total Electron Content (TEC) over the Indian low latitude sector. *Adv. Space Res.*, **49**: 898—913.
- Rishbeth H.H., 1998. How the thermosphere circulation affects the ionosphere F2-layer. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **60**: 1385.
- Shweta, Mukherjee, Shivalika, Sarkar P.K., Purohit et al., 2010. Seasonal variation of total electron content at crest of equatorial anomaly station during low solar activity condition. *Adv. Space Res.*, **46**: 291—295.
- Torr M.R., et al., 1973. The seasonal behavior of the F2-layer of the ionosphere. *Atmos. Terr. Phys.*, **35**(12): 2237.

Analysis of Variation Characteristic of VTEC in Kunming Based on JPL-GIM Data

Zhang Hui¹⁾, Ma Juan¹⁾, Miao Jie²⁾, Li Guangsong³⁾,
Fan Jun³⁾, Liu Kai⁴⁾ and Zheng Tuo⁵⁾

1) Shandong Province Changyi Seismic Station, Weifang 261300, China

2) Shandong Province Lingyang Seismic Station, Rizhao 276800, China

3) Shandong province Seismological Bureau of Weifang Municipality, Weifang 261300, China

4) Shandong Province Dezhou Seismic Station, Dezhou 253000, China

5) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract The data downloaded from JPL-GIM (Jet Propulsion Laboratory-Global Ionosphere Map) in region Kunming (25.25°N, 102.64°E) during 2001–2012 is used to analyze the characteristics of temporal variation of VTEC (Vertical Total Electron Content). The results show that the maximum value occurs at 08: 00UT during spring, autumn and winter while at 10: 00UT during summer and the averaged minimum occurs at 22: 00UT for all seasons. A seasonal anomaly of VTEC is found with the high value occurring during spring and autumn seasons while low value during summer and winter seasons. VTEC reveals a decreasing tendency from 2001 to 2009 and increases during 2010, which is corresponding with the annual variation of solar and geomagnetic activity. The correlation analysis exhibits that the variation of VTEC has a good relation with solar activities with a value of over 0.8, while it shows a weak relationship with the geomagnetic activity.

Key words: Kunming region; VTEC; Seasonal variation