

颜蕊, 王兰炜, 胡哲, 刘大鹏. 2017. 利用地基观测对卫星观测电离层结构参数的定量验证研究. 地震学报, 39(4): 549-557. doi:10.11939/jass.2017.04.009.

Yan R, Wang L W, Hu Z, Liu D P. 2017. Quantitative verification on satellite observational data of ionospheric structure parameters using ground-based data. Acta Seismologica Sinica, 39(4): 549-557. doi:10.11939/jass.2017.04.009.

利用地基观测对卫星观测电离层 结构参数的定量验证研究^{*}

颜蕊^{1,2,3)} 王兰炜^{1,2)} 胡哲^{1,2),†} 刘大鹏^{1,2)}

1) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

2) 中国北京 100085 北京市地震观测工程技术研究中心

3) 法国奥尔良 45000 奥尔良大学法国国家科学研究中心空间和环境物理化学实验室

摘要 本文采用散点图、趋势线、相关系数及观测偏差等统计方法,利用 COSMIC 卫星和 SPIDR 提供的垂测仪观测的 F_2 层峰值电子密度数据,开展了综合统计及按季节、地方时和纬度的分类统计. 统计结果显示:地基垂测仪与卫星观测到的相应的 F_2 层峰值电子密度数据具有很高的相关性,两者之间的相关系数高达 0.95,相对偏差的平均值为 -3.38% ,标准差为 19.54% . 基于上述研究结果,提出了利用地面垂测仪观测数据验证卫星观测的电离层结构参数的方法,并给出了定性的判别依据和定量的判别标准,可在我国电磁监测试验卫星发射后,为 F_2 层峰值电子密度观测数据的真实性和有效性提供检验方法和保障.

关键词 电磁监测试验卫星 COSMIC 电离层峰值电子密度 电离层测高仪

doi:10.11939/jass.2017.04.009

中图分类号: P352.7

文献标志码: A

Quantitative verification on satellite observational data of ionospheric structure parameters using ground-based data

Yan Rui^{1,2,3)} Wang Lanwei^{1,2)} Hu Zhe^{1,2),†} Liu Dapeng^{1,2)}

1) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2) Beijing Engineering Research Center of Earthquake Observation, Beijing 100085, China

3) Laboratory of Physics and Chemistry of Environment and Space, National Center for Scientific Research, University of Orléans, Orléans 45000, France

Abstract: Based on the previous research results, we used some statistical methods such as scatter plot, trend line, correlation coefficient and deviation to process the peak electron density ($N_m F_2$) data received by COSMIC satellite and SPIDR ground ionosonde. Both total data statistics and classified data statistics by season, local time and latitude are employed in order to carry out the research on quantitative verification on ionospheric structure parameters. The

^{*} 基金项目 国家自然科学基金(41404058)、中国地震局地壳应力研究所基本科研业务专项(ZDJ2014-11)和民用航天科研项目“电磁监测试验卫星数据地面验证技术研发”共同资助.

收稿日期 2017-02-17 收到初稿, 2017-06-29 决定采用修改稿.

[†] 通讯作者 e-mail: 13811039498@139.com



results show that the N_mF_2 of COSMIC satellite is consistent with the measured value of ionosonde with correlation coefficient 0.95 and average relative difference -3.38% , along with the standard deviation 19.54% . Based on the study, the verification method of N_mF_2 observed by satellite is given, and the qualitative and quantitative criteria are also provided, which will ensure the quality of N_mF_2 observed by China Seismo-Electromagnetic Satellite (CSES).

Key words: CSES; COSMIC; N_mF_2 ; ionosonde

引言

随着空间技术的不断发展,利用卫星技术观测地震前的各种异常变化受到了地震学研究人员的广泛关注,被认为是研究地震前兆的有效途径之一(Gokhberg *et al*, 1982, 1983; Molchanov *et al*, 1993; Hayakawa *et al*, 1996; Liu *et al*, 2004; Parrot *et al*, 2006). 电磁监测卫星作为研究地球电磁环境的重要手段,在地震监测预测研究方面具有广阔的应用前景. 2004 年 6 月法国 DEMETER 卫星的发射推进了这一领域的发展(Cussac *et al*, 2006),该卫星于 2010 年 12 月结束观测,运行期间共积累了六年半的电离层观测数据,为空间地震前兆观测研究积累了数据和经验(张学民等, 2016).

经过多年的研究和筹备,中国电磁监测试验卫星(China Seismo-Electromagnetic Satellite, 简称为 CSES)将于 2018 年年初发射. 该卫星是我国地震立体观测体系的第一个专用天基平台,主要用于监测与地震相关的空间电离层异常,其上搭载感应式磁力仪、高精度磁强计、电场探测仪、等离子体分析仪、朗缪尔探针、GNSS 掩星接收机、三频信标机和高能粒子探测器等 8 个载荷(王兰炜等, 2016). 其中用于探测电离层结构参数的载荷是 GNSS 掩星接收机和三频信标机,探测及反演的物理量包括 F_2 层峰值电子密度(peak electron density of the F_2 region, 简称为 N_mF_2)、电离层剖面及总电子浓度(total electron content, 简称为 TEC).

为了确保数据的真实性和有效性, CSES 的应用系统建立了比测校验场,其主要目的是通过对比地面与卫星的观测数据来验证卫星观测数据的可靠性,同时为研究异常信号从地面到电离层的传播提供基础观测数据,实现与地震相关的电磁信号的监测. CSES 比测校验场可开展电离层测高和 GPS/北斗等地基电离层观测,进而与卫星 GNSS 掩星接收机和三频信标观测数据进行对比分析(王兰炜等, 2016).

根据前人的研究,电离层结构参数中的 N_mF_2 和峰值高度(peak height of the F_2 region, 简称为 h_mF_2)可进行定量地面验证,最常用的方法是将掩星或三频信标观测数据的反演结果与垂测仪、非相干散射雷达(incoherent scatter radar, 简称为 ISR)仪或电离层模型值进行比对和统计分析(Tsai *et al*, 2001; Lei *et al*, 2007; 吴小成, 2008; Kelley *et al*, 2009; 徐贤胜等, 2010; 赵莹, 张小红, 2010; 赵莹, 2011). 通常,由掩星反演得出的 N_mF_2 与垂测仪获得的观测结果的平均相对偏差为 1% ,标准差在 20% 以内,相关系数一般在 0.9 以上,峰值高度也具有一定的一致性,但相关性较差(Hajj, Romans, 1998; 徐贤胜等, 2010; 赵莹, 2011). CHAMP 卫星与 ISR 观测的 N_mF_2 和 h_mF_2 的平均偏差分别为 1.7% 和 4.1% ,标准差分别为 17.8% 和 13.1% (Jakowski *et al*, 2002).

利用无线电波全反射获取的垂测数据 N_mF_2 , 排除了人工和智能判读等误差因素,通

常被认为是非常准确的. 通过垂测手段得到的回波描述是电离层的虚高, $h_m F_2$ 需要通过反演方法得到, 其准确性难以保证, 因此 $h_m F_2$ 一般以非相干散射雷达的测量结果为准. 作者在研究过程中对 $N_m F_2$ 和 $h_m F_2$ 均进行了统计分析, 鉴于垂测仪观测的 $h_m F_2$ 准确性有限, 不能提供准确的检验标准, 仅能作为参考. 因此本文只详细论述 $N_m F_2$ 的定量检验结果, 对 $h_m F_2$ 的统计结果不再赘述.

卫星监测数据的真实性和有效性是保证卫星运行后数据能够较好地得以应用的基础. 本研究即是基于前人的研究结果, 在中国电磁监测试验卫星发射前, 利用可以获取的与我国电磁卫星观测的电离层结构参数一致的 COSMIC 卫星数据, 以及与比测校验场垂测仪观测对象一致的空间物理交互数据资源(space physics interactive data resource, 简称为 SPIDR)提供的地面垂测仪数据, 开展卫星观测的 $N_m F_2$ 的地面验证研究, 确定利用地面垂测仪观测数据定量地验证卫星观测数据的标准, 并探索利用比测校验场地面观测数据定量地检验电磁监测试验卫星结构参数观测数据的方法, 从而为我国电磁监测试验卫星发射后电离层结构参数观测数据的真实性和准确性把关, 使之更好地在地震监测预测及空间物理研究等方面发挥作用.

1 数据源、数据的筛选和处理

1.1 数据源及其初步筛选

本研究所用的卫星观测数据为 COSMIC 卫星数据分析和存储中心(CDAAC, 2016)提供的 2 级电离层剖面数据, 所用地面观测数据为 SPIDR(2016)提供的 49 个电离层测高站的观测资料. 上述观测数据的获取时间均为 2009 年 1 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日.

为了更好地利用地面电离层测高站的数据来验证卫星观测数据, 首先对垂测仪观测数据的质量进行控制: ① 若某时刻只能获取 F_2 层的临界频率(critical frequency of F_2 region, 简称为 $f_o F_2$)和 $h_m F_2$ 观测值中的一个, 则舍弃该时刻的观测值; ② 若某个 $f_o F_2$ 观测值与该时刻的 27 天滑动平均值相差大于 40%, 则舍弃该观测值; ③ 选取 $h_m F_2$ 在 150—500 km 之间所对应的数据; ④ 选取当日日平均 A_p 指数小于 12 的观测数据(吴小成, 2008).

根据前人的研究成果(Hajj, Romans, 1998; 吴小成, 2008; 徐贤胜等, 2010; 赵莹, 2011)和本文的研究目标, 对垂测仪和卫星观测的 $N_m F_2$ 进行初步筛选: ① 两类数据观测位置的经纬度相差均需控制在 2.5° 以内; ② 两类数据的观测时间差应控制在 30 分钟以内.

对经过上述筛选得到的结果利用拉依达法则(俞钟行, 1989), 剔除明显异常的观测值. 设 X_i 为 $N_m F_2$ 或 $h_m F_2$, 计算每个台站 $N_m F_2$ 和 $h_m F_2$ 的均值 \bar{X} 和方差 δ , 剔除 $|X_i - \bar{X}| > 3\delta$ 的观测数据, 直到 $N_m F_2$ 和 $h_m F_2$ 同时满足 $|X_i - \bar{X}| \leq 3\delta$ (Guo *et al.*, 2015). 经过初步筛选, 最初选择的 49 个台站中有 30 个台站的观测数据满足条件.

1.2 数据的统计处理及进一步筛选

1.2.1 散点图、趋势线和相关系数

散点图是表示变量间关系的图形, 趋势线则是反映变量间近似关系的直线, 线性相关系数可反映两个变量间相关性的. 生成垂测仪和卫星观测的 $N_m F_2$ 观测数据对的散点图, 利用最小二乘法得到线性回归趋势线(式 1), 计算趋势线的截距 a_0 和斜率 a_1 , 同时根据式(2)计算观测数据对的相关系数 r , 判断其相关度.

$$y=a_0+a_1x,$$

(1)

$$r=\frac{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^n(y_i-\bar{y})^2}},$$

(2)

线性相关系数 r 越接近于 1, 则表明二者的变化趋势越一致; 趋势线斜率 a_1 接近于 1, 则表明二者数值较为接近.

1.2.2 观测偏差

相对偏差 E_R 、绝对偏差 E_A 和标准差 σ 的计算公式分别为

$$E_R=\frac{X_{\text{ion}}-X_{\text{occ}}}{X_{\text{occ}}}\times 100\%,$$

(3)

$$E_A=X_{\text{occ}}-X_{\text{ion}},$$

(4)

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^N(x_i-\bar{x})^2},$$

(5)

式中, X_{occ} 为卫星观测的 $N_{\text{m}}F_2$, X_{ion} 为垂测仪观测的 $N_{\text{m}}F_2$, N 为观测数据对的个数. 平均相对偏差小, 则观测结果具有较高的一致性. 由于掩星探测的 $N_{\text{m}}F_2$ 的绝对值在不同位置、不同时刻变化很大, 故其相对偏差的意义大于绝对偏差(吴小成, 2008), 因此本节中所

表 1 筛选出的 18 个台站的垂测数据与 COSMIC 观测数据的相关系数及相对偏差统计表

Tabel 1 The correlation coefficients and deviations between the inosodes
and COSMIC data observed by 18 stations

台站编号	N	a_1	r	M_R	σ_R	M_A / (10^{10} m^{-3})	σ_A / (10^{10} m^{-3})
PSJ5J	412	0.91	0.96	−1.57%	18.75%	−3.22	10.36
HE13N	281	1.01	0.99	−0.03%	13.36%	−0.61	5.08
LV12P	126	1.03	0.98	−2.43%	13.26%	−2.01	6.69
PRJ18	119	0.97	0.94	−4.73%	17.30%	−4.69	16.76
OK426	150	0.90	0.89	−13.17%	26.99%	12.25	28.89
PA836	69	0.98	0.93	5.26%	19.68%	−0.42	4.44
GM037	135	1.22	0.89	−15.71%	19.00%	−13.32	20.60
WP937	230	1.05	0.94	2.07%	18.03%	−1.07	9.06
AT138	244	1.24	0.94	−13.89%	17.63%	−8.89	13.89
BC840	332	1.00	0.97	−0.89%	18.24%	1.01	6.68
EB040	284	1.16	0.96	−3.38%	17.76%	3.58	10.18
PQ052	431	1.00	0.96	−0.37%	16.86%	−0.98	6.69
RL052	477	1.07	0.96	−1.48%	17.53%	−1.58	6.35
MO155	184	0.99	0.98	−6.79%	17.79%	−1.67	4.75
AS00Q	335	1.08	0.91	−12.94%	20.73%	−13.03	22.53
BP440	41	1.32	0.91	−7.89%	17.71%	−9.02	17.33
HAJ45	123	1.05	0.90	7.85%	25.97%	0.15	9.51
IR352	322	1.05	0.97	1.86%	21.45%	0.97	7.61

注: N 为观测数据对的个数, a_1 为趋势线的斜率, r 为观测数据对的相关系数, M_R , σ_R , M_A , σ_A 分别为相对偏差 E_R 和绝对偏差 E_A 所对应的平均值和标准差, 下同.

给出的绝对偏差数据仅作为参考，不作讨论。

综合分析 30 个台站的相关系数 r 、趋势线的拟合斜率 a_1 、相对偏差 E_R 及绝对偏差 E_A 等统计结果，对观测数据作第二次筛选，最终选择 N_mF_2 的相关系数约为 0.9，相对偏差的平均值在 16% 以内的 18 个台站的垂测数据及其相应的 COSMIC 卫星观测数据进行最终的统计分析。

2 结果分析

2.1 总体统计结果

综合筛选得出的 18 个台站，共得到 4 295 对 N_mF_2 观测数据，将其绘制成如图 1 所示的散点图，图中 r 为相关系数， $F(x)$ 为根据式(1)拟合得到的回归曲线。可以看出垂测仪和卫星观测的 N_mF_2 ，其相关系数达到 0.95，相对偏差的平均值为 -3.38%，标准差为 19.54%。垂测仪和卫星观测的 N_mF_2 数据的相关性高，这与已有研究结果也比较一致(吴小成, 2008; 徐贤胜等, 2010; 赵莹, 2011)。

2.2 分类统计结果

将筛选出的 18 个台站的观测数据按不同季节、地方时及纬度进行分类后再作统计分析。

纬度 φ 划分原则为： $\varphi < 30^\circ$ 为低纬度区， $30^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$ 为中纬度区， $\varphi > 60^\circ$ 为高纬度区。由于本文筛选后所得的台站均未处于高纬度区，因此只有中、低纬数据，其散点图如图 2 所示。

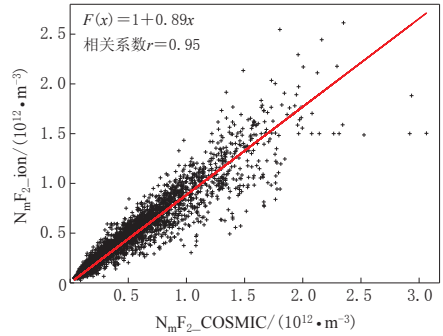


图 1 4 295 对 N_mF_2 的散点图与趋势线
Fig. 1 The scatter plot and trend line of 4 295 pairs of N_mF_2

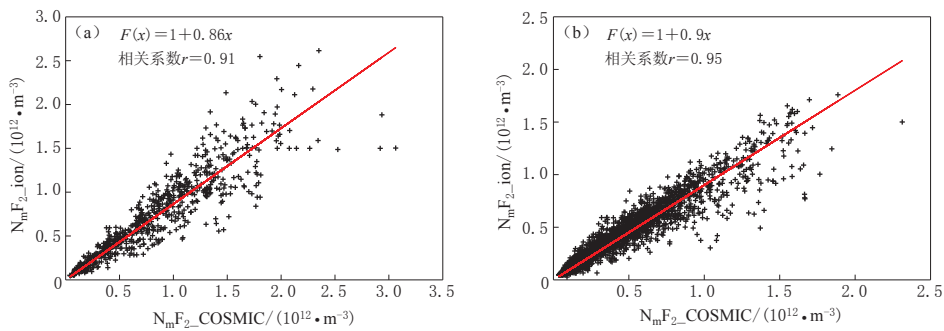


图 2 低纬度(a)和中纬度(b)地区 N_mF_2 的散点图
Fig. 2 The scatter plots of N_mF_2 in low (a) and middle (b) latitude area

季节划分原则为：将南半球的 11, 12, 1 月和北半球的 5—7 月作为夏季，将南半球的 5—7 月和北半球的 11, 12, 1 月作为冬季，将 2—4 月和 8—10 月作为春秋季节。不同季节分类下 N_mF_2 的散点图如图 3 所示。

地方时划分原则为：白天(08:00—16:00)、夜间(20:00—04:00)和晨昏(04:00—08:00和 16:00—20:00)。不同地方时分类下 N_mF_2 的散点图如图 4 所示。

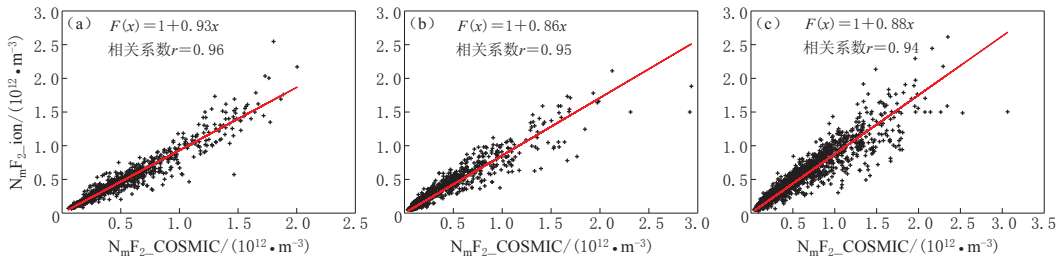


图 3 夏季(a)、冬季(b)和春秋分(c) N_mF_2 的散点图

Fig. 3 The scatter plots of N_mF_2 in summer (a), winter (b) and equinox (c)

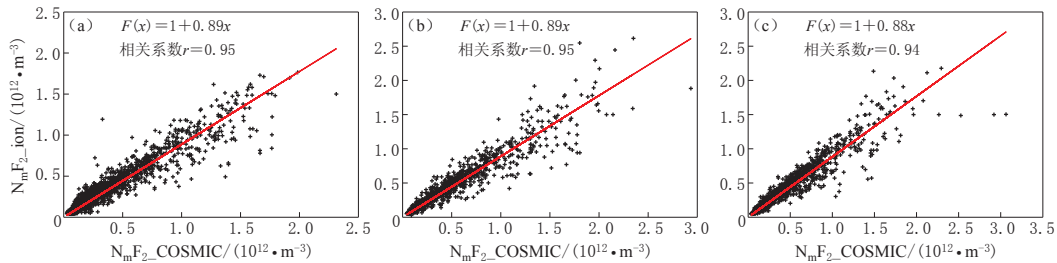


图 4 白天(a)、夜间(b)及晨昏(c) N_mF_2 的散点图

Fig. 4 The scatter plots of N_mF_2 in day time (a), during the night (b) and in twilight (c)

表 2 给出了 N_mF_2 在不同分类下相关系数 a_1 和 r 的统计结果, 表 3 给出了 N_mF_2 在不同分类下相对偏差的综合分析结果. 可以看出, 不同分类下 N_mF_2 的相关系数均能达到 0.9, 相对偏差的平均值均在 20% 以内, 标准差均在 25% 以内.

表 2 不同分类下 N_mF_2 的相关系数统计表

Table 2 Statistical results on the correlation coefficients of N_mF_2 in different classification

		夏季		冬季		春秋分	
		a_1	r	a_1	r	a_1	r
低纬	白天	1.04	0.92	0.93	0.93	0.97	0.93
	夜间	1.33	0.91	0.88	0.95	0.98	0.91
	晨昏	1.09	0.93	0.93	0.92	0.97	0.89
中纬	白天	0.96	0.97	0.83	0.93	0.89	0.94
	夜间	0.99	0.96	1.00	0.96	0.93	0.96
	晨昏	0.99	0.95	0.95	0.97	0.96	0.95

同时也可以看出: N_mF_2 的相对偏差在中、低纬度地区夏季最小, 冬季最大, 春秋分介于两者之间; 中纬度地区相对偏差明显小于低纬度地区; 在不同地方时下的相对偏差并没有随着中低纬及季节性的改变而规律地变化. 需要注意的是: 在不同分类中, 参与运算的观测数据的数量会影响统计结果的准确性, 图 5 是两类观测数据相对偏差的累积分析, 即随着观测数据的增多, 分别逐次计算不同数量观测数据的相对偏差, 以分析其随着数据量增多的变化情况. 图 5a 所用数据为获取的全部观测数据, 即 4 295 对观测数据, 可以看出, 当数据对数量逐渐增多时, 两类观测数据的观测偏差趋于稳定, 此时的观测偏差能反映两类观测设备之间所存在的客观观测差别, 从而获取两类观测数据之间的观测偏差; 图 5b

所选数据为低纬度地区夏季白天时段的观测数据对，共 50 对，可以看出，数据对数量较少时，平均相对偏差波动较大，统计结果不能客观地反映两类观测数据的相关性。

表 3 在不同分类下的 $N_m F_2$ 相对偏差统计表

		Table 3 The relative difference statistical results of $N_m F_2$ in different classification														
N			M_R			σ_R			$M_A/(10^{10} \text{ m}^{-3})$			$\sigma_A/(10^{10} \text{ m}^{-3})$				
白天	夜间	晨昏	白天	夜间	晨昏	白天	夜间	晨昏	白天	夜间	晨昏	白天	夜间	晨昏	白天	夜间
夏 低纬	50	38	51	-3.69%	-1.84%	-12.70%	20.49%	20.19%	17.01%	-3.91	-0.70	-9.56	15.41	23.33	18.00	
季 中纬	268	307	256	-2.97%	-4.29%	-4.45%	15.67%	17.40%	16.10%	-3.03	-2.76	-2.91	8.29	7.69	7.48	
冬 低纬	53	60	57	-9.37%	-16.69%	-10.90%	19.83%	22.81%	22.04%	-6.90	-14.71	-11.32	15.48	20.33	23.23	
季 中纬	302	281	244	-2.26%	3.51%	0.55%	21.98%	21.80%	23.00%	-3.64	0.20	-1.03	13.66	7.84	6.71	
春 低纬	184	109	128	-7.63%	-12.39%	-10.98%	17.70%	22.71%	24.06%	-6.19	-14.49	-13.22	14.77	27.61	27.68	
秋 中纬	643	633	631	-3.00%	-2.12%	-1.97%	18.98%	18.36%	17.27%	-3.93	-2.52	-2.16	12.03	9.36	8.89	

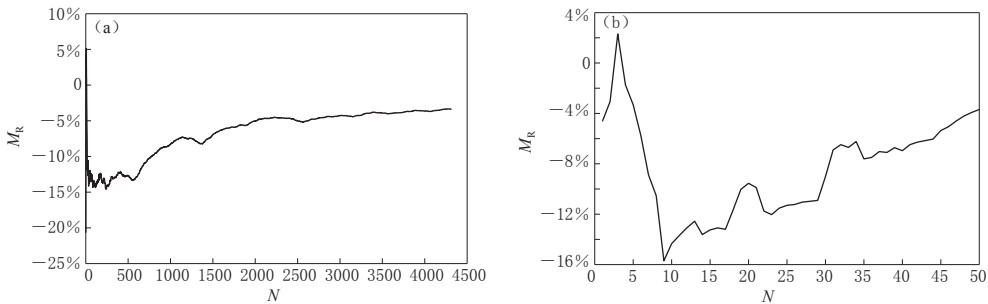


图 5 全部观测数据(a)和低纬度地区夏季白天时段(b)观测数据的平均相对偏差 M_R 累积分析图
Fig. 5 The cumulative sequence of average relative difference M_R for total data (a)
and the data in low latitude in summer during the daytime (b)

3 讨论与结论

本文采用散点图、趋势线、相关系数及观测偏差等统计方法，利用 COSMIC 卫星和 SPIDR 提供的垂测仪观测的 $N_m F_2$ 数据，开展了统计分析和定量检验方法的研究。基于本文的研究结果，得到如下结论：

- 1) 在对电磁监测试验卫星的电离层结构观测数据进行验证时，可使用本文介绍的方法，包括数据选取及通过两轮筛选挑选出质量较好的地面、卫星观测数据对，利用散点图计算出回归曲线斜率并统计出相关系数和相对、绝对观测偏差等。
- 2) 若选取与本文相同的 SPIDR 的 18 个垂测台站的观测数据进行统计分析，当所选数据对达到 2000 对以上时，则 $N_m F_2$ 的平均相对误差可控制在 10% 以内(图 5a)，其相关系数可达 0.9 以上，相对偏差的标准差在 25% 以内。
- 3) 在 18 个台站中挑选出相关性更好的台站，例如表 1 中加粗显示的 10 个台站，进行单个台站观测数据的检验。由于这些台站的观测数据质量更好，因此用来验证卫星观测数据时，统计定量指标会高于选用 18 个台站时给出的定量标准。
- 4) 由不同分类的统计结果可以看出： $N_m F_2$ 的相对偏差在中、低纬度的夏季最小，冬季最大，春秋季介于中间；中纬度偏差明显小于低纬度。地方时分类下 $N_m F_2$ 的相对偏差并没有随着中低纬以及季节性的变化而有规律地变化。该结论完全基于客观的统计数据得

出,但是由于分类时,观测数据对数量不同,对统计结果会有一定的影响,因此本结论可在对电磁卫星观测数据进行验证时,作为定性的辅助判断,综合结论宜结合定量标准给出。

需要说明的是,中国电磁监测试验卫星的应用系统建立了比测校验场,有可用于电离层结构参数验证的地面垂测观测设备。例如可利用比测场新建设的垂测设备进行中国电磁监测试验卫星电离层结构参数的验证,其过程为先衡量比测场垂测设备观测数据的精度,经过一段时间的数据积累,判断其观测误差范围后,再给出定量的判别指标。建议在未统计出观测误差范围之前,结合本文建议的 SPIDR 提供的台站数据共同分析。同时,掩星反演本身也有误差,电离层反演误差的主要因素是电离层球对称假设。 $N_m F_2$ 误差最大可超过 30%(Guo *et al*, 2015),在实际验证时,避开受球对称假设影响较大的时空区域,获得的地基检验可能会更加准确。

本文的定量标准是基于已有的可获取的卫星和地面观测数据,在大量统计结果的基础上得出的,同时综合了前人的研究结果,因此文中对等离子体原位及结构参数的地面验证方法,可应用于电磁监测试验卫星应用系统的比测校验分系统中,作为后续电磁监测试验卫星发射运行后,对卫星观测数据的有效检验。

上海天文台郭鹏研究员对本文的撰写给予了指导和帮助, COSMIC 卫星数据分析和存储中心(CDAAC)提供了 COSMIC 的掩星观测资料,空间物理交互数据资源(SPIDR)提供了电离层测高仪资料,作者在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 王兰炜, 申旭辉, 张宇, 张兴国, 胡哲, 颜蕊, 袁仕耿, 朱兴鸿. 2016. 中国电磁监测试验卫星工程研制进展[J]. 地震学报, **38**(3): 376–385.
- Wang L W, Shen X H, Zhang Y, Zhang X G, Hu Z, Yan R, Yuan S G, Zhu X H. 2016. Developing progress of China Seismo-Electromagnetic Satellite project[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **38**(3): 376–385 (in Chinese).
- 吴小成. 2008. 电离层无线电掩星技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院空间科学与应用研究中心: 79–85.
- Wu X C. 2008. *Radio Occultation Technique for Ionosphere Detection*[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences: 79–85 (in Chinese).
- 徐贤胜, 洪振杰, 郭鹏, 刘荣建. 2010. COSMIC 掩星电离层资料反演以及结果验证[J]. 物理学报, **59**(3): 2163–2168.
- Xu X S, Hong Z J, Guo P, Liu R J. 2010. Retrieval and validation of ionospheric measurements from COSMIC radio occultation[J]. *Acta Physica Sinica*, **59**(3): 2163–2168 (in Chinese).
- 俞钟行. 1989. 拉依达准则用于剔除物探数据中的坏值[J]. 物探与化探, **13**(3): 238–240.
- Yu Z X. 1989. Pauta criterion for the bad data elimination in geophysical data[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, **13**(3): 238–240 (in Chinese).
- 张学民, 申旭辉, 赵庶凡, 刘静, 欧阳新艳, 姜文宇, 泽仁志玛, 何建辉, 钱庚. 2016. 地震电离层探测技术及其应用研究进展[J]. 地震学报, **38**(3): 356–375.
- Zhang X M, Shen X H, Zhao S F, Liu J, Ouyang X Y, Lou W Y, Zeren Z M, He J H, Qian G. 2016. The seismo-ionospheric monitoring technologies and their application research development[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **38**(3): 356–375 (in Chinese).
- 赵莹, 张小红. 2010. COSMIC 掩星观测数据反演电离层电子密度廓线[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, **35**(6): 644–648.
- Zhao Y, Zhang X H. 2010. Inversion of ionospheric electron density profiles with COSMIC occultation data[J]. *Geoma-*

- tics and Information Science of Wuhan University*, **35**(6): 644–648 (in Chinese).
- 赵莹. 2011. GNSS 电离层掩星反演技术及应用研究[D]. 武汉: 武汉大学: 42–51.
- Zhao Y. 2011. *GNSS Ionospheric Occultation Inversion and Its Application*[D]. Wuhan: Wuhan University: 42–51 (in Chinese).
- CDAAC. 2016. COSMIC data analysis and archive center[EB/OL]. [2016-07-12]. http://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac/cgi_bin/fileFormats.cgi?type=ionPrf.
- Cussac T, Clair M A, Ultré-Guerard P, Buisson F, Lassalle-Balier G, Ledu M, Elisabelar C, Passot X, Rey N. 2006. The DEMETER microsatellite and ground segment[J]. *Planet Space Sci*, **54**(5): 413–427.
- Gokhberg M B, Morgounov V A, Yoshino T, Tomizawa I. 1982. Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related to earthquakes in Japan[J]. *J Geophys Res*, **87**(B9): 7824–7828.
- Gokhberg M B, Pilipenko V A, Pokhotelov O A. 1983. Satellite observation of the electromagnetic radiation above the epicentral region of an incipient earthquake[J]. *Doklady Acad Sci USSR Earth Sci Sect*, **268**(1): 5–7.
- Guo P, Wu M J, Xu T L, Jin H L, Hu X G. 2015. An Abel inversion method assisted by background model for GPS ionospheric radio occultation data[J]. *J Atmos Solar-Terrest Phys*, **123**: 71–81.
- Hajj G A, Romans L J. 1998. Ionospheric electron density profiles obtained with the global positioning system: Results from the GPS/MET experiment[J]. *Radio Sci*, **33**(1): 175–190.
- Hayakawa M, Kawate R, Molchanov O A, Yumoto K. 1996. Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August, 1993[J]. *Geophys Res Lett*, **23**(3): 241–244.
- Jakowski N, Wehrenpfennig A, Heise S, Reigber C, Lühr H, Grunwaldt L, Meehan T K. 2002. GPS radio occultation measurements of the ionosphere from CHAMP: Early results[J]. *Geophys Res Lett*, **29**(10): 95-1–95-4.
- Kelley M C, Wong V K, Aponte N, Coker C, Mannucci A J, Komjathy A. 2009. Comparison of COSMIC occultation-based electron density profiles and TIP observations with Arecibo incoherent scatter radar data[J]. *Radio Sci*, **44**(4): RS4011.
- Lei J H, Syndergaard S, Burns A G, Solomon S C, Wang W B, Zeng Z, Roble R G, Wu Q, Kuo Y H, Holt J M, Zhang S R, Hysell D L, Rodrigues F S, Lin C H. 2007. Comparison of COSMIC ionospheric measurements with ground-based observations and model predictions: Preliminary results[J]. *J Geophys Res*, **112**(A7): A07308.
- Liu J Y, Chuo Y J, Shan S J, Tsai Y B, Chen Y I, Pulinets S A, Yu S B. 2004. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements[J]. *Ann Geophys*, **22**(5): 1585–1593.
- Molchanov O A, Mazhaeva O A, Golyavin A N, Hayakawa M. 1993. Observation by the Intercosmos-24 satellite of ELF-VLF electromagnetic emissions associated with earthquakes[J]. *Ann Geophys*, **11**(5): 431–440.
- Parrot M, Berthelier J J, Lebreton J P, Sauvaud J A, Santolik O, Blecki J. 2006. Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER satellite over seismic regions[J]. *Phys Chem Earth A/B/C*, **31**(4/5/6/7/8/9): 486–495.
- SPIDR. 2016. Space physics interactive data resource[EB/OL]. [2016-07-12]. <http://spidr.ionosonde.net/spidr/query.do?group=Iono&>.
- Tsai L C, Tsai W H, Schreiner W S, Berkey F T, Liu J Y. 2001. Comparisons of GPS/MET retrieved ionospheric electron density and ground based ionosonde data[J]. *Earth Planets Space*, **53**(3): 193–205.