

IGRF12 和 WMM2015 模型在中国区域的精度评估及其适用性分析

聂琳娟^{1,2} 邱耀东¹ 申文斌^{1,3} 张素琴⁴ 张兵兵¹

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 湖北水利水电职业技术学院,湖北 武汉,430070

3 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

4 中国地震局地球物理研究所,北京,100081

摘 要:利用中国大陆区域 35 个地磁基准台站 2008 ~ 2015 年的观测数据,结合高精度的地壳磁场模型 NGDC-720,计算各台站观测值和地磁场模型值 7 个要素之间的差值。通过引入均方根误差,评估最新的国际地磁参考场模型 IGRF12 和世界地磁模型 WMM2015 在中国区域的精度及其适用性。结果表明,IGRF12 模型与台站年均值的一致性吻合较好,但对于不同台站,IGRF12 模型误差相差较大。WMM2015 和 IGRF12 模型误差具有相似的空间分布特征,且地磁各要素差值的最大值、最小值和均方根误差十分接近,其中地磁偏角和总磁场强度的均方根误差优于 16' 和 100 nT。因此,在研究中国区域地磁异常时,IGRF12 或 WMM2015 模型均可作为主磁场改正的参考背景场。

关键词:IGRF12;WMM2015;NGDC-720;均方根误差
中图法分类号:P318 **文献标志码:**A

地磁场是由地球内部不同构造部分的磁性物质和动力学过程中以及地球内部和外部的电流体系所产生的各种磁场组合叠加的结果^[1]。作为地球的固有物理场,地磁场在矿产资源勘探、地震火山监测预警、运动载体导航/定向以及水下目标探测等领域有着广泛的应用。地磁异常场对研究地壳构造和地磁导航具有潜在的应用价值^[2-4],主磁场的合理选择对地壳磁异常的建模至关重要。通常情况下,将国际参考地磁场(International Geomagnetic Reference Field, IGRF)和世界地磁模型(World Magnetic Model, WMM)作为主磁场的参考背景场^[5]。受台站分布不均、测量噪声、边界效应、截断误差和延拓误差等因素的影响,地球主磁场在建模过程中会引入不同量级的各种误差,所以在地磁场的科学研究和实际应用领域中,需要事先了解模型在所关注区域的精度^[6]。

2015 年,美国国家海洋和大气管理局下属的国家地球物理数据中心(National Oceanic and Atmospheric Administration's National Geophysical

Data Center, NOAA/NGDC)曾组织一些学者分析过 IGRF12 和 WMM2015 模型的全球区域精度^[7]。高国明等^[8]利用 17 个地磁台站 2004 年的年均值数据,对 IGRF10 模型的精度进行了评估。刘元元等^[9]对 IGRF11 模型精度进行分析,发现 WMM2010 模型的精度要高于 IGRF11 模型,在细节刻画上较 IGRF11 模型更为精确。常宜峰等^[10]利用中国 10 个地磁台站在 2011.5 年的观测数据,通过计算 IGRF11 模型和 WMM2010 模型的均方根误差,发现 WMM2010 模型的整体精度优于 IGRF11 模型。徐如刚等^[11]利用 1 302 个地面磁测点和 32 个地磁台站的观测数据,对 WMM2010、IGRF11 和增强地磁模型(enhanced magnetic model 2010, EMM2010)的精度做了对比分析,结果显示 WMM2010 与 IGRF11 模型的精度较为接近,EMM2010 模型的精度最高,EMM2010 模型各要素的平均精度提升了约 50%,主要是因为 EMM2010 融入了高精度的磁异常模型。需要注意的是,上述学者在分析 IGRF 和 WMM 模型在

收稿日期:2016-12-17
项目资助:国家自然科学基金(41274032,41474018)。
第一作者:聂琳娟,博士,副教授,主要从事地磁场模型反演及地学应用研究。ljnie@whu.edu.cn
通讯作者:邱耀东,博士生,研究方向为卫星磁测数据处理与地磁导航。ydaqiu@whu.edu.cn

中国大陆区域的误差时,并未考虑地壳磁异常的影响,若要保证检验理论的严密性,在数值计算过程中,需将主磁场模型与扣除地壳磁异常之后的台站观测值进行定量比较分析^[12]。

本文利用中国大陆区域 36 个地磁基准台站 2008~2015 年的磁静日观测数据,借助于高精度的地壳异常场模型 NGDC-720(NGDC-720 lithospheric magnetic model),将扣除地壳磁异常和后的台站观测值分别与 IGRF12 和 WMM2015 模型值作对比分析,利用数值统计结果,评估 IGRF12 和 WMM2015 模型在中国区域的精度及其适用性。

1 IGRF/WMM/NGDC-720 模型

为了描述地磁场时空非线性变化特征,自 1965 年起,国际地磁与高空大气物理协会(International Association of Geomagnetism and Aeronomy, IAGA)每隔 5 年更新发布新一代的国际地磁参考场模型,IGRF 是关于地球主磁场及其长期变化的模型^[13-15]。2014 年 12 月,IAGA 发布了第 12 代 IGRF 模型(IGRF12),至此 IGRF 包括了 1900~2015 年(间隔 5 年)共 24 个主磁场模型,其适用的时间范围为 1900-01-01~2019-12-31。IGRF12 融合了卫星(Swarm:2013-2014、Ørsted:1999-2013、CHAMP:2000-2010、SAC-C:2001-2013)、地面台站观测数据和地面流动磁测数据,球谐系数 13 阶,对应的空间分辨率为

3 000 km。(http://www.ngdc.noaa.gov/IA-GA/vmod/igrf.html)。该模型地磁强度的全球估计精度约为 50~300 nT^[16],可应用于地核、地壳、电离层和磁层的科学研究。

WMM 是由美国国家地理空间情报局(National Geospatial-Intelligence Agency, NGA)和英国国防地理中心(Defence Geographic Centre, DGC)提供资助,并由美国国家地球物理数据中心(NGDC)联合英国地质调查局(British Geological Survey, BGS)共同研制的世界地磁模型。该模型主要为美国、英国国防部、北大西洋公约组织和国际海道测量组织提供导航及定向服务,同时在民用导航定位系统和航向姿态测量系统中也有着广泛应用。WMM 模型、相关软件和数据文件由 NGA 授权 NGDC 每隔 5 年更新发布一次,最新的世界地磁模型 WMM2015 于 2014 年 12 月发布,有效使用期为 2015-01-01~2019-12-31^[17]。该模型所使用的数据主要包括卫星磁测(Swarm:2013-2014、Ørsted:1999-2013、CHAMP:2000-2010)和地面台站时均值两种类型,球谐系数 12 阶,对应的空间分辨率为 3 200 km。该模型主要用于描述地球主磁场,同时也兼顾到地壳磁场和海洋感应磁场的长波成分。WMM2015 模型估计精度优于美国军方提出的 MIL-W-89500 标准,表 1 给出了 WMM2015 模型各地磁要素的全球估计精度^[17], D 、 I 、 X 、 Y 、 Z 、 H 、 F 依次表示站心坐标系下磁偏角、磁倾角、地磁强度的北向、东向、垂直、水平分量和地磁总强度(称为地磁要素)。

表 1 WMM2015 和 MIL-W-89500 全球估计精度(RMS)

Tab.1 Estimated Global RMS Errors of WMM2015 and WMM 2015

	$D/^{\circ}$	$I/^{\circ}$	H/nT	X/nT	Y/nT	Z/nT	F/nT
MIL-W-89500	60	60	200	140	140	200	280
WMM2015	28.2	13.2	133	138	89	165	152

美国国家地球物理数据中心和英国地质调查局在研制 WMM 系列模型的同时,构建了一个高阶地壳磁异常模型,相应的椭球谐系数为 16~719 阶,球谐级数为 16~740 阶,对应的空间波长为 56~2 500 km。该模型综合利用了卫星、海洋、航空和地面磁测数据。在数据处理过程中,首先将海洋和航空磁测数据融合到 2 弧分的地球磁异常空间网格数据模型(Earth Magnetic Anomaly Grid-2 minute grid, EMAG2),然后将 CHAMP 卫星数据反演的地壳磁异常模型(Lithospheric Magnetic Field Model 6, MF6)作为该模型的低阶项(16~120 阶,对应波长 $\geq 330\text{km}$),最后采用最小二乘反演得到模型的球谐

系数。本文通过比较分析 NGDC-720 与 EMM2015 模型高阶项(16~720 阶)计算的地磁要素差值,发现在同一点上,两模型所计算的地磁强度和磁偏角互差分别优于 10 nT 和 0.1'。由此可以说明,NGDC-720 所引入的误差量级较小,在评估中国区域地球主磁场模型的精度时,将其作为地壳磁异常的参考背景场具备可行性。

2 IGRF12/WMM2015 在中国大陆区域的误差分析

为了验证最新的 IGRF12 模型与地面台站观测值的一致性,并比较 IGRF12 与 WMM2015 模

型在中国大陆区域的整体精度,本文进行两个方面算例分析。

1) 利用 2008.0~2015.0 的台站年均值、NGDC-720 和 IGRF12 模型值,计算台站值与模型值的差值,检验 IGRF12 与台站观测值的时变规律是否具有 consistency,分析各台站所处位置的磁场环境,结合各台站地磁要素的均方根误差,评估 IGRF12 模型在我国大陆区域的整体精度。

2) 利用 2015-01~2015-09 的台站观测数据、NGDC-720 和 IGRF12/WMM2015 模型值,计算 IGRF12 和 WMM2015 模型地磁各要素的均方根误差,比较 IGRF12 与 WMM2015 模型的差异,并对其适用性进行评估。

2.1 地磁台站观测数据

本文采用的地磁台站数据包括中国大陆区域 36 个地磁台站 2008.0~2015.0 的年均值以及 2015-01~2015-09 台站观测值的平均值。考虑到外界磁场环境干扰的影响,本文参考了国家地磁台网中心提供的台站运行状态资料,受环境磁场影响较大的北京站、佘山站、贵阳站、德都站、银川站和大连站的观测数据未纳入本文计算。

2.2 模型精度评价方法

地磁模型精度评估主要包括以下两种方法。

1) 通过式(1)计算模型值与台站观测值差值的标准差来评估模型的精度。

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(\Delta - \bar{\Delta})^2]}{n}}$$
 (1)

式中,Δ 为模型值和观测值的差值;Δ̄ 为差值的均值;n 为测站个数或同一台站重复观测次数。

2) 将台站观测值视为真值,并通过式(2)计算模型的均方根误差来评估模型的精度。

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - L)^2}{n}}$$
 (2)

式中,X 为评估模型值;L 为观测值;n 为测站个数或重复观测次数。

为了分析上述两种计算方法的差异,设模型值为 X,台站观测值为 L,真值为 L̃,观测值 L 的随机噪声为 ε。由于观测值描述的是综合场源的大小,模型值主要描述的是主磁场的大小,因此相对于观测值,可认为模型值含有随机系统误差 s。

在实际计算时,真值是未知的,常用的方法是借助于高精度的台站观测值来评估模型的精度。由此,模型所产生的误差 Δ 可定义为:

$$\Delta = \tilde{L} - X \Leftrightarrow \Delta = L - X$$
 (3)

式中,Δ 不仅包含有观测值的随机误差 ε,还包含有模型的随机系统误差 s,即:

$$\Delta = \epsilon + s$$
 (4)

X 的均方误差为:

$$MSE(X) = E(X - L)^2 = E(\Delta^2) = E(\epsilon^2) + E(s^2)$$
 (5)

Δ 的数学期望和方差分别为:

$$E(\Delta) = E(\epsilon + s) = E(\epsilon) + E(s) = 0 + \bar{s} = \bar{s} \neq 0$$
 (6)

$$D_{\Delta} = E(\Delta - \bar{\Delta})^2 = E(\epsilon + s - \bar{s})^2 = E(\epsilon^2) + E(\Delta_s^2)$$
 (7)

在评价模型精度时,若将观测值视为真值,则 ε 可理解为被模型随机系统误差 s 所吸收,故 DΔ 实际反映的是模型偶然误差方差的大小,而 MSE(X)对模型特大或特小的误差反映非常敏感,所以当模型值 X 中既存在偶然误差 ε,又存在系统误差 s 时,通常采用均方误差 MSE(X)来衡量模型的精度。

依据上述分析,式(1)反映的是模型的偶然误差,式(2)描述的是模型的综合误差,故用式(2)来衡量模型的精度更具合理性。

2.3 IGRF12 模型与台站年均值对比分析

为了分析 IGRF12 模型在中国大陆区域的整体精度,本文利用 IGRF12 模型计算了 2008.0~2015.0 年间 35 个台站地磁各要素的年均值,将其与对应时间段扣除了 NGDC-720 地壳磁异常的台站观测值做对比分析,并按式(2)进一步计算地磁各要素的均方根误差,统计结果见表 2。

由表 2 中台站地磁各要素的均方根误差统计结果可以看出。各台站同一地磁要素的均方根误差相差较大。满洲里站、乌鲁木齐站、西昌站、泰安站、杭州站和拉萨站误差相对较大。以杭州站为例,Y 分量误差高达 611.84 nT。产生过大误差的主要原因一是台站所在位置磁异常偏大,NGDC-720 模型未能对小区域的磁异常进行准确改正;二是台站所处位置很可能受到了外部磁场环境的干扰。为了分析误差产生的具体原因,针对第一类误差,利用最新的 EMM2015 综合场模型对杭州站进行改正,改正之后 I、Y 分量和总磁场强度的残差仍然高达 45.6′、467.2 nT 和 240.8 nT,可见其误差并未大幅度减弱。因此,少数台站误差偏大的主要原因可能源于外界环境的干扰。

若排除上述误差偏大的 6 个台站,地磁各要素 D、I、H、X、Y、Z、F 均方根误差的平均值分别为 4.89′、3.86′、57.57 nT、55.91 nT、44.26 nT、

表 2 IGRF12 模型的均方根误差
Tab. 2 Estimated RMS Errors of IGRF12

台站	$D/^{\circ}$	$I/^{\circ}$	H/nT	X/nT	Y/nT	Z/nT	F/nT
通海 (THJ)	0.74	0.40	37.05	36.83	11.22	38.10	52.61
兰州 (LZH)	0.83	2.80	10.82	10.85	7.57	71.36	53.03
泉州 (QZH)	0.96	4.00	61.82	61.55	12.24	116.63	118.97
满洲里 (MZL)	1.27	1.87	120.00	119.61	12.44	234.72	262.56
九峰 (WHN)	1.35	4.56	6.23	6.70	14.19	93.58	65.32
榆林台 (YUL)	1.62	3.86	5.75	5.94	16.24	100.68	79.20
太原 (TAY)	1.67	4.46	40.12	41.23	11.53	57.25	26.59
邵阳 (SYG)	1.90	1.37	7.30	8.18	22.36	29.63	24.02
乾陵 (QIX)	2.28	4.55	82.28	83.35	11.47	20.10	30.33
长春 (CNH)	2.30	2.95	27.84	25.11	19.19	53.23	34.33
喀什 (KSH)	3.03	7.44	48.24	49.60	21.60	158.69	111.95
琼中 (QGZ)	3.03	0.55	45.53	46.33	31.37	23.10	50.33
邕宁 (YON)	3.12	0.44	17.45	18.46	30.30	12.71	20.92
静海 (JIH)	3.16	0.44	9.83	11.82	23.36	14.50	16.39
昌黎 (CHL)	3.26	3.72	9.04	6.53	27.86	95.80	77.97
嘉峪关 (JYG)	3.52	1.91	20.82	21.10	25.89	77.55	75.92
洛阳 (LUY)	3.68	1.47	64.35	66.99	30.95	56.74	83.88
天水 (TSY)	3.99	15.85	91.99	90.74	38.71	284.62	171.69
蒙城 (MCH)	4.02	4.53	118.52	120.90	24.47	36.54	102.90
成都 (CDP)	4.27	2.05	57.54	56.56	39.75	15.11	48.63
呼和浩特 (HHH)	5.28	13.05	172.64	168.09	57.18	127.30	25.00
格尔木 (GLM)	5.29	2.39	45.58	45.51	44.34	8.94	19.74
狮泉河 (SQH)	5.55	2.07	156.20	154.84	57.46	142.34	209.12
重庆 (COQ)	6.45	7.66	140.41	137.95	66.88	21.71	83.99
隆尧 (LYH)	7.45	2.06	58.51	64.34	58.64	35.70	61.58
肇庆 (GZH)	7.50	0.86	11.69	8.99	80.42	27.49	24.73
郟城 (TCH)	8.57	1.79	35.80	27.56	81.37	11.83	15.99
乌鲁木齐 (WMQ)	10.82	15.73	192.12	195.61	69.58	213.42	115.86
恩施 (ESH)	11.33	5.73	79.11	72.76	118.97	43.11	23.68
崇明 (COM)	13.37	0.41	26.18	38.14	130.38	27.33	37.25
西昌 (XIC)	15.40	22.67	247.07	242.33	171.17	209.10	41.65
乌加河 (WJH)	22.21	8.58	180.76	192.57	167.51	50.72	132.79
泰安 (TAA)	30.16	42.93	539.18	563.54	216.18	358.70	32.66
拉萨 (LSA)	33.40	5.48	200.79	199.51	334.21	100.13	209.84
杭州 (HZC)	61.51	5.13	17.98	43.68	611.84	82.13	46.89
最小	0.74	0.40	5.75	5.94	7.57	8.94	15.99
最大	61.51	42.93	539.18	563.54	611.84	358.70	262.56
平均	8.41	5.88	85.33	86.97	77.11	87.16	73.95

63.88 nT 和 64.79 nT,而 IGRF 模型的全球估计精度为 50~300 nT^[16],故 IGRF12 模型能准确描述中国大陆区域主磁场的空间分布。

7 个地磁要素中, X 与 H , Y 与 D , Z 、 I 与 F 所对应的误差呈现出相似的空间分布特征。

为了研究 IGRF12 的时变特征,本文选取地处不同经纬度的 6 个地磁台站,分析 2008.0~2015.0 年间各台站 D 、 H 、 Z 三分量随时间的变化规律,对 IGRF12 模型与台站年均值的一致性进行检验,其结果如图 1 所示(下标 m 代表模型 k 值, l 代表台站观测值)。根据图 1 中 IGRF12 模型与台站年均值的对比分析,可以看出:

1) 在 2013 年,乌鲁木齐(WMQ)台站观测值存在明显突变,与 IGRF12 模型值的变化趋势差

异较大,需仔细核查该台站的位置坐标和数据处理质量,并从台站的观测环境和区域地磁场的变化等角度展开分析。

2) 除乌鲁木齐(WMQ)台站外,其他台站观测值与 IGRF12 模型值显著相关,表明 IGRF 模型可以较为准确描述中国区域地磁场的长期变化特征。

3) 所有台站的 H 分量呈下降趋势, Z 分量呈上升趋势,且在 5 年尺度上,地磁要素的线性变化趋势较为明显。

2.4 IGRF12 和 WMM2015 模型精度对比分析

考虑到 WMM2015 模型的适用范围为 2015-00~2020-00,为了研究 IGRF12 模型和 WMM2015模型在中国区域的适用性差异,本文

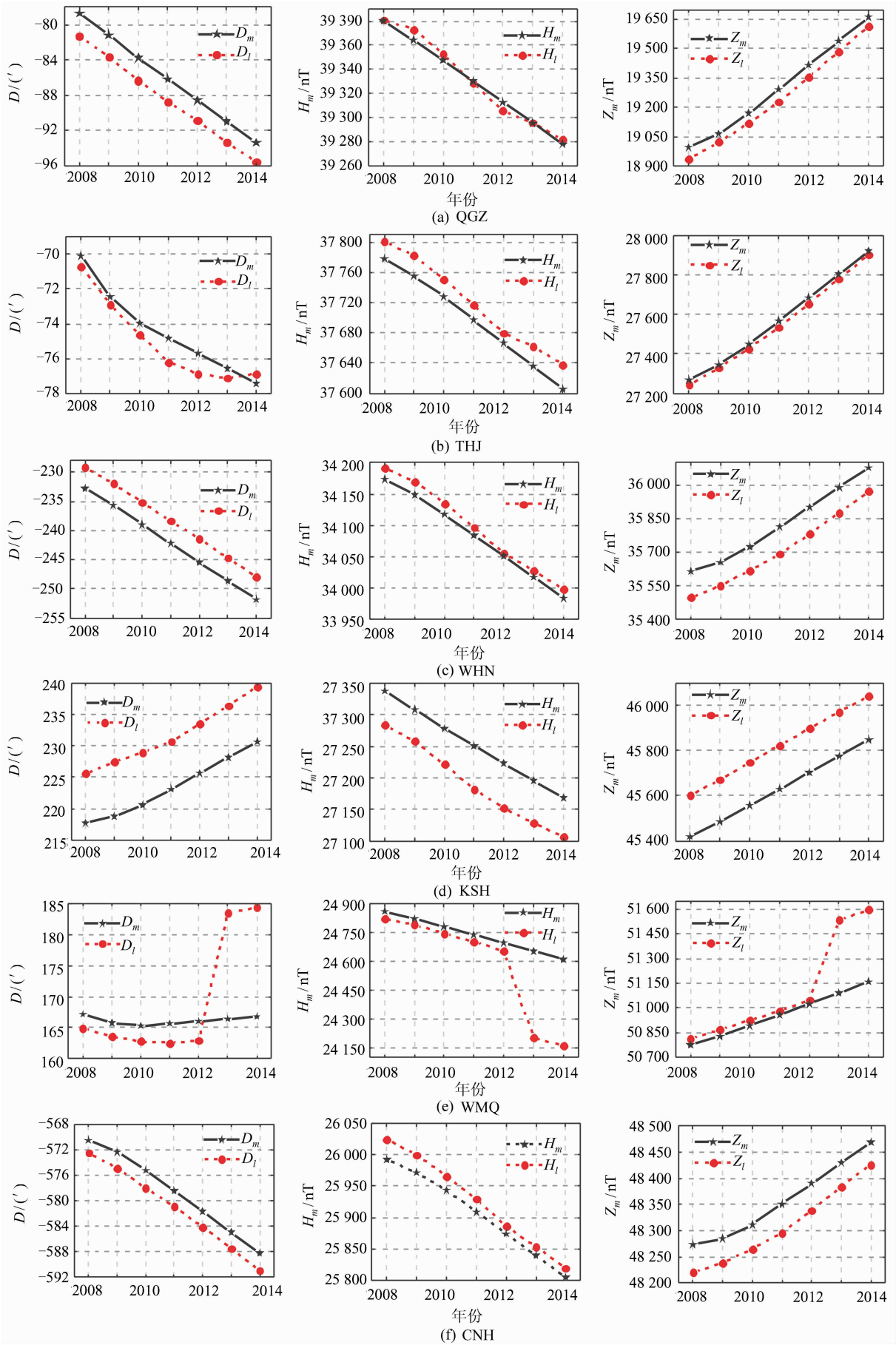


图 1 IGRF12 模型值和台站观测值的变化特征

Fig. 1 Time-Varying Characteristics of IGRF12 and Observatories

利用 IGRF12 和 WMM2015 模型分别计算了 35 个地磁台站各要素 2015-01~2015-09 的月均值,利用 NGDC-720 地壳磁异常模型对月均值进行改正,

计算了 7 个地磁要素模型值与扣除地壳磁异常后的台站观测值的差值,并按式(2)计算了各模型地磁要素的均方根误差(RMSE),统计结果见表 3。

表 3 中国大陆区域 IGRF12 和 WMM2015 模型的精度统计分析
Tab. 3 Precision Statistics Analysis of IGRF12 and WMM2015 in China Mainland

模型		$D/(^{\circ})$	$I/(^{\circ})$	H/nT	X/nT	Y/nT	Z/nT	F/nT
IGRF12	最小	0.22	0.29	2.61	1.66	1.11	1.41	2.11
	最大	61.61	41.77	525.30	550.38	609.60	308.15	261.09
	RMS	15.30	10.79	144.99	148.44	142.79	129.87	99.84
WMM2015	最小	0.28	0.12	0.34	0.02	3.23	7.77	3.53
	最大	62.08	42.08	529.63	554.00	614.16	411.02	247.65
	RMS	15.27	10.82	145.75	149.07	142.77	129.04	99.34

通过计算分析,结合表 3 可以得出以下结论。
1) 磁偏角 D 的极大值位于杭州站和泰安站, Y 的极大值位于杭州站、崇明站和泰安站, I 、 Z 的极大值位于泰安站和乌鲁木齐站, X 、 H 的极大值位于乌鲁木齐站和泰安站, F 的极大值位于满洲里站和呼和浩特站,对于这些误差较大的台站,应从多角度仔细分析其成因。

2) WMM2015 与 IGRF12 模型地磁各要素的最大值、最小值和均方根误差十分接近,两模型 D 、 I 、 H 、 X 、 Y 、 Z 、 F 要素的整体精度均优于 $16'$ 、 $11'$ 、 150 nT 、 150 nT 、 145 nT 、 130 nT 和 100 nT 。

3) IGRF12 和 WMM2015 模型在各台站的误差大小相当,表明 IGRF12 和 WMM2015 模型误差具有相似的空间分布特征,因此在研究中国区域地磁异常时,将 IGRF12 或 WMM2015 模型作为正常场,均具可行性。

3 结 语

本文利用中国区域 35 个地磁基准台站的最新观测数据,对 IGRF12 和 WMM2015 模型误差展开定量分析。结果表明,IGRF12 与 WMM2015 模型地磁各要素的整体精度十分接近,在中国大陆区域,WMM2015 的 D 、 I 、 Z 和 F 地磁要素精度明显优于 NGDC 给出的全球估计精度,IGRF 模型精度呈现显著的区域性分布特征,但 IGRF12 和 WMM2015 模型误差具有相似的空间分布特征。因此,在构建中国区域地磁异常模型时,将 IGRF12 或 WMM2015 作为参考背景场,对于主磁场的改正均具适用性;引起 IGRF12 和 WMM2015 模型误差的主要原因包括忽略了被截断的高阶部分所代表的地壳磁异常,忽略了外源场所引起的误差,全球台站与测点分布不均匀,以及测量误差和卫星磁测数据的延拓误

差;整体上讲,3 000 km 尺度的 IGRF12 和 WMM2015 模型,均不能准确描述中国区域的地磁场信息,其空间分辨率亦不能反映地磁场的局部精细结构。因此,联合多源磁测数据建立中国高精度的地磁模型,具有强烈的现实性和紧迫性。

参 考 文 献

[1] Xu Wen Yao. Geomagnetism[M]. Beijing: Seismological Press, 2003(徐文耀. 地磁学[M]. 北京:地震出版社,2003)

[2] An Zhenchang. Regional and Global Geomagnetic Field Models [J]. *Progress in Geophysics*, 1995,10(3):63-72(安振昌. 区域和全球地磁场模型[J]. 地球物理学进展, 1995,10(3):63-72)

[3] Chang Yieng. Research on Satellite Geomagnetic Data Process and Geomagnetic Model Recovery Theory and Method[D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2015(常宜峰. 卫星磁测数据处理与地磁场模型反演理论与方法研究[D]. 郑州:信息工程大学,2015)

[4] Feng Yan, An Zhenchang, Sun Han, et al. A Study on Model of Geomagnetic Normal Field of China Region [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(7):723-729(冯彦, 安振昌, 孙涵,等. 中国地区地磁正常场模型研究[J]. 地球科学进展, 2010, 25(7): 723-729)

[5] Gao Jintian, An Zhenchang, Gu Zuowen. Selections of the Geomagnetic Normal Field and Calculation of the Geomagnetic Anomalous Field [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(1):56-62(高金田, 安振昌, 顾左文. 地磁正常场的选取与地磁异常场的计算[J]. 地球物理学报, 2005,48(1):56-62)

[6] Wang Danwen. Analysis of the International Geomagnetic Reference Field Error in the China Continent [J]. *Chinese Journal Geophysics*, 2003, 46(2):171-174(王亶文. 国际地磁参考场在中国大陆地区的误差分析[J]. 地球物理学报, 2003,46(2):63-73)

[7] Thébault E, Finlay C C, Alken P, et al. Evaluation of Candidate Geomagnetic Field Models for IGRF-12 [J]. *Earth , Planets and Space*, 2010, 62 (10): 787-804

[8] Gao Guoming, Kang Guofa. The Compare Analysis of Satellite Geomagnetic Model Values and IGRF Model Values with Observed Values of Geomagnetic Observatories in China [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2010, 32(5): 547-552(高国明, 康国发. 卫星地磁场模型和 IGRF 模型与中国地磁台观测值的比较分析[J]. 云南大学学报·自然科学版, 2010, 32(5): 547-552)

[9] Liu Yuanyuan, Zhang Jinsheng, Sun Yuan, et al. World Magnetic Model EMM2010 and Its Application [J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27 (5): 1 939-1 946(刘元元, 张金生, 孙渊, 等. 世界地磁场模型 EMM2010 及其应用[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(5): 1 939-1 946)

[10] Chang Yifeng, Chai Hongzhou, Ming Feng, et al. Compare of WMM2010 and IGRF11 Model with Annual Mean Value of Geomagnetic Observatories [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39 (8): 923-928(常宜峰, 柴洪洲, 明锋, 等. 世界地磁场模型 WMM2010 与台站年均值对比[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(8): 923-929)

[11] Xu Rugang, Li Zhejun, Zhang Weijing, et al. Accuracy and Application of EMM2010 in Chinese Mainland [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44 (3): 1 018-1 030(徐如刚, 黎哲君, 张玮晶, 等. EMM2010 模型在中国大陆的精度评估及其适用性[J]. 吉林大学学报·地球科学版, 2014, 44(3): 1 018-1 030)

[12] Zhang Suqin, Yang Dongmei, Li Qi, et al. The Consistence Analysis of IGRF Model Value and Annual Mean Value of Some Geomagnetic Observatories in China [J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2008, 29 (2): 42-49(张素琴, 杨冬梅, 李琪, 等. 中国部分地磁台站年均值与 IGRF 模型一致性分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2008, 29(2): 42-49)

[13] Brian H, Ridley V A, Beggan C D, et al. The BGSMagnetic Field Candidate Models for the 12th Generation IGRF [J]. *Earth Planets and Space*, 2015, 67(1): 1-15

[14] Bai Chunhua, Xu Wenyao, Kang Guofa. Main-Geomagnetic Models [J]. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(4): 1 045-1 057(白春华, 徐文耀, 康国发. 地球主磁场模型[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(4): 1 045-1 057)

[15] Chen Bin, Gu Zuowen, Gao Jintian, et al. Geomagnetic Secular Variation in China During 2005-2010 Described by IGRF-11 and Its Error Analysis [J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27 (2): 512-521(陈斌, 顾左文, 高金田, 等. IGRF11 描述的 2005-2010 年中国地区地磁长期变化及其误差分析[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(2): 512-521)

[16] Angelo D S, Roberta T, Luis R G P. Information Content and Kentropy of the Present Geomagnetic Field [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 18(4): 269-275

[17] Chulliat A. The US/UK World Magnetic Model for 2015-2020 [R]: USA: Technical Report, National Geophysical Data Center, 2015, NOAA. doi: 10. 7289/V5TB14V7

Accuracy Evaluation and Applicability of IGRF12 and WMM2015 Model in Chinese Mainland

NIE Linjuan^{1,2} QIU Yaodong¹ SHEN Wenbin^{1,3} ZHANG Suqin⁴ ZHANG Bingbing¹

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China
2 Hubei Water Resources Technical College, Wuhan 430070, China
3 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China
4 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract: In this paper, we calculate the differences of a geomagnetic field between observatories and the main magnetic field by using NGDC-720 model and observed data collected at 36 stations from 2008 to 2015 in the Chinese mainland area. The accuracy and applicability of the IGRF12 and WMM2015 models were evaluated with the RMSE. The results suggest that; the IGRF12 model is in good agreement with the annual mean value of geomagnetic observatories; but for different stations, (下转第 1291 页)

Building Detection from High Resolution Remote Sensing Imagery Based on a Deformable Part Model

SHEN Jiajie^{1, 2} PAN Li¹ HU Xiangyun¹

1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China
2 Hubei Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Wuhan 430079, China

Abstract: The characteristics of high resolution remote sensing imagery—complex scenes, diversity, various forms of one target, and so on—make automatic building detection difficult. . In recent years, the deformable part model (DPM) has become widely used in the field of pattern recognition, and effective for target recognition in natural scenes. In this paper, we propose a new method of building detection using high resolution remote sensing imagery, based on DPM. This method considers a building as a combination of deformable parts, obtains its template parameters by training, and traverses images with a sliding window to detect buildings. Experiments show the validity of the method.

Key words: high resolution remote sensing imagery; building detection; deformable part model; DPM

First author: SHEN Jiajie, PhD candidate, engineer, specializes in map updating. E-mail: alice606522@163.com
Foundation support: The National Basic Research Program of China, No. 2012CB719900.

.....

(上接第 1235 页)

the precision of IGRF12 model presents a huge difference. The model error in IGRF12 and WMM2015 have similar spatial distribution characteristics, and the maximum, minimum, and as root mean of magnetic elements are very close to one another. The RMSE of declination and the total magnetic field were 16' and 124.96 nT. Therefore, in studies of regional geomagnetic anomalies, regardless of the IGRF12 or WMM2015 as main magnetic field, both are feasible.

Key words: IGRF12; WMM2015; NGDC-720; RMSE

First author: NIE Linjuan, PhD, associate professor, specializes in geomagnetic field inversion recovery theory and geological application research. Email: llnie@whu.edu.cn
Corresponding author: QIU Yaodong, PhD candidate, specializes in satellite geomagnetic data processing and geomagnetic navigation. E-mail: ydquiu@whu.edu.cn
Foundation support: The National Natural Science Foundation of China Nos. 41274032, 41474018; the Open Research Fund Program of the State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics No. SKLGED2017-2-2-E.